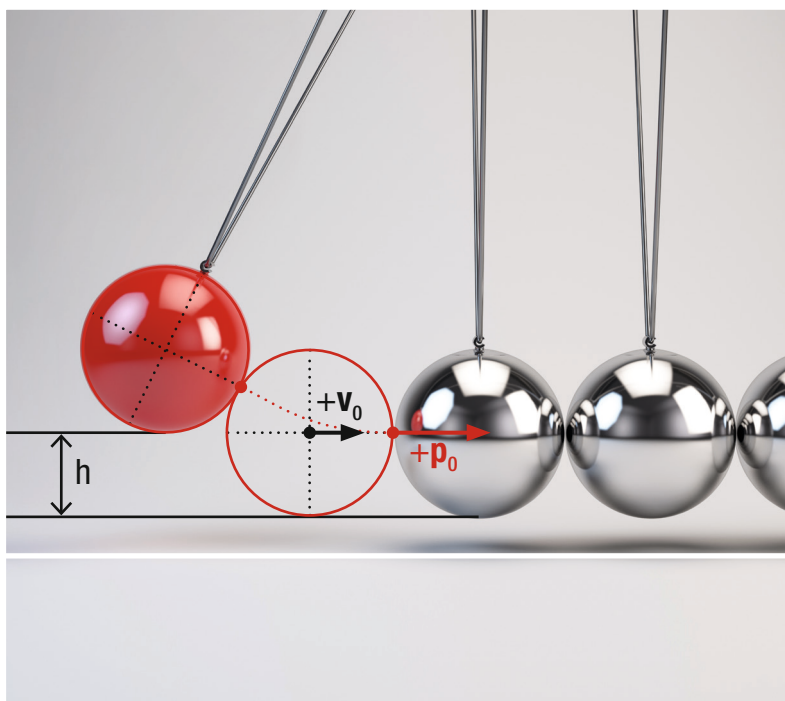


Werner Bieck

Impulsströme

Eine Einführung in die Grundlagen der
physikalischen Modellierung



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Werner Bieck

Impulsströme

Eine Einführung in die Grundlagen der
physikalischen Modellierung

HANSER

Über den Autor:

Dr. Werner Bieck, Dipl.-Phys. und wissenschaftlicher Autor, Wiltingen



Print-ISBN: 978-3-446-47702-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-47789-6

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © shutterstock.com/Sashkin

Satz: Eberl & Kösel Studio, Kempten

Druck und Bindung: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Für Ulrike ...

In Erinnerung an einen besonderen Menschen – Rosi.

Vorwort

„Der Spaß an der Wissenschaft liegt nicht in der Entdeckung von neuen Sachverhalten, sondern darin, neue Denkansätze für sie zu entwickeln.“

William Lawrence Bragg¹

Im Verlauf der naturwissenschaftlichen Ausbildung von Schülern und Studenten ist leider immer wieder festzustellen, dass ein wesentlicher Aspekt wissenschaftlichen Arbeitens konsequent vernachlässigt wird: Die Vermittlung der Grundzüge physikalischer Modellierung. Eine dezidierte Unterscheidung zwischen Modell und Erfahrungswelt (→ „*Realität*“), welche in der Naturwissenschaft immer nur ausschnittsweise durch ein geeignet zu wählendes Modell beschrieben werden kann, findet nicht statt. Vielmehr vermittelt die Lehre oftmals den falschen Eindruck, dass ein Modell – einmal validiert – der Realität gleichzusetzen sei, d.h. Modelle herangezogen werden können, um Phänomene aus der Erfahrungswelt zu *erklären*, also im Sinne von *zu beweisen, warum* sich Dinge genau so verhalten, wie zu beobachten ist. Dieser Eindruck wird bereits in der Schulausbildung bewusst oder unbewusst vermittelt, verbaut dadurch oftmals die Sicht auf die wesentlichen Aspekte naturwissenschaftlicher Arbeit und sorgt selbst später im Studium für Verwirrung, insbesondere dann, wenn verschiedene und scheinbar widersprüchliche Modelle herangezogen werden können, um die gleiche Sache zu *beschreiben*. *Erklärung* im wissenschaftlichen Kontext heißt eben nur, dass man Phänomene mithilfe eines Modells auf wenige grundlegende Prinzipien zurückführen und hierüber klassifizieren kann. *Nicht mehr, aber auch nicht weniger!*

Ein schönes Beispiel hierfür ist das physikalische Konzept der „*Kraft*“, worauf wir noch später im Buch ausführlich eingehen werden. Diese Modellvorstellung wurde seinerzeit u.a. von Isaac Newton axiomatisch eingeführt und seither von Generationen von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren erfolgreich eingesetzt, um unterschiedlichste Bereiche der Erfahrungswelt zu beschreiben. Dennoch hat bis zum heutigen Tage *niemand* jemals eine „*Kraft*“ *gemessen*! Das Konzept der Kraft ist vielmehr eine reine Modellgröße, gewissermaßen eine Rechenvorschrift innerhalb der Modellwelt, deren Entsprechung in der realen Welt immer noch nicht gefunden wurde, weil nicht gefunden werden kann. Diese Aussage mag auf den ersten Blick überraschen, zumal doch bereits in der Schule scheinbar überzeugend vermittelt wird, was „*Kräfte*“ sind und wie diese wirken, um in der Folge bereitwillig zu akzeptieren, es täglich mit „*realen Kräften*“ zu tun zu haben, die sich zudem mithilfe von „*Kraftmessern*“ auf einfache Weise messtechnisch erfassen lassen. Ein

grundlegender Irrtum, welcher letztlich auf ein fehlendes Modellverständnis zurückzuführen ist.

Die mangelnde Differenzierung zwischen Modell und Realität sorgt nicht nur bei der theoretischen Beschreibung physikalischer Zusammenhänge für Probleme, auch der experimentelle Zugang wird oftmals fehlerhaft interpretiert. Einerseits ist der Messaufbau häufig theoretisch motiviert, dient er doch der Validierung theoretischer (Vor-)Überlegungen mittels quantitativer Erfassung bestimmter modellspezifischer Größen. Andererseits stellt das Experiment oftmals eine Vereinfachung der zu untersuchenden realen Gegebenheiten dar, um beispielsweise auf diese Weise erst einen messtechnischen Zugang zu ermöglichen, welcher ansonsten aufgrund der Komplexität der Problemstellung oder aufgrund gegebener apparativer Einschränkungen scheitern müsste. Das Experiment kann somit selbst wieder ein eigenes Modell der Erfahrungswelt sein und die zugehörige Messgröße, d. h. beispielsweise die *reale* Digitalanzeige eines Messinstrumentes, kann in der Folge nur bedingt der *theoretischen* Modellgröße entsprechen! Leider ist aber immer wieder festzustellen, dass bei einer quantitativen Abweichung zwischen Theorie und Experiment der *realen* Anzeige eines Messgerätes mehr Vertrauen entgegengebracht wird als jeder *theoretischen* Simulation. Nicht selten unterliegt man intuitiv dem Trugschluss, *real* ist per se *richtig*, weil gemessen und greifbar. *Theoretisch* hingegen ist gleichzusetzen mit *fiktiv* und damit zwangsläufig *fehlerbehaftet*. Beide Aspekte der Modellierung unserer Erfahrungswelt sollen in diesem Buch ausführlich behandelt werden, mit dem Ziel, die wesentlichen Grundlagen der wissenschaftlichen Modellierung anhand konkreter Beispiele aus Physik und Technik zu vermitteln. Dies scheint mir umso wichtiger, als die rechnergestützte Modellierung zur Simulation physikalischer oder ingenieurtechnischer Zusammenhänge, sowohl in der Ausbildung als auch im späteren Berufsleben, mittlerweile eine zentrale Rolle spielt. Der Software-Anwender *muss* hierbei stets wissen, wie das von ihm eingesetzte *Programm* arbeitet, d. h. was die implementierten *Berechnungsmodelle* bestenfalls liefern können, um letztendlich entsprechende Simulationsergebnisse korrekt zu interpretieren.

Im Laufe meiner langjährigen beruflichen Tätigkeit in der industriellen Forschung und Entwicklung habe ich u. a. mit Physikern, Mathematikern und Ingenieuren, mehrheitlich aus den Bereichen Elektrotechnik bzw. Maschinenbau, zahlreiche Modelle zur Produkt- und Prozessoptimierung entwickelt und konnte auf diese Weise erfahren, dass die Physik diesbezüglich so manches aus den Ingenieurwissenschaften lernen kann. Während wir Physiker im Laufe unserer Ausbildung erlernen wie komplexe Problemstellungen auf einfache Prinzipien zurückgeführt und diese experimentell geprüft werden können (→ Reduktionismus), so hat der Ingenieur auch weiterhin in der komplexen Erfahrungswelt zu arbeiten und muss genau hierfür tragfähige Lösungsansätze entwickeln, die im Physikstudium gar nicht oder nur selten vermittelt werden. Stattdessen werden typischerweise Vor-

lesungsreihen „Physik für ...“ angeboten, um Studenten, gleich welcher Disziplin, die Grundzüge und Arbeitsweisen der Physik näher zu bringen. Dieses recht einseitige Unterfangen wissenschaftlichen Austauschs mag zu Recht den Eindruck einer gewissen „akademischen Überheblichkeit“ wecken, die uns Physikern anzuhaften scheint. Es lohnt sich aber, die Perspektive zu wechseln und physikalische Problemstellungen auch aus Sicht anderer wissenschaftlicher Disziplinen zu betrachten und zu verstehen! Deshalb verbinde ich mit diesem Buch nicht zuletzt die Hoffnung, dass meine Erfahrungen aus interdisziplinärer Forschung und Entwicklung dazu beitragen mögen, den leider oftmals steinigen Weg der Physikausbildung ein wenig zu erleichtern, indem ich alternative Perspektiven auf unsere Erfahrungswelt aufzeigen möchte – Denkanstöße, die es erlauben sollten das physikalische Modellverständnis zu fördern und damit so manche historisch bedingte „Hürde der Erkenntnis“ mit etwas mehr Leichtigkeit zu nehmen.

Werner Bieck

Wiltingen, Oktober 2023

Danksagung

Dieses Buch entstand in einem Zeitraum von etwa drei Jahren. Die Ausarbeitung des Manuskripts wurde sukzessive fortgeführt, gerade so wie es die Zeit erlaubte – neben Familie und Beruf, samt den negativen Auswirkungen der Corona-Pandemie. Ein besonderer Dank gilt deshalb meiner Frau Ulrike für ihre stete Unterstützung und ihr Verständnis für den wissenschaftlichen Enthusiasmus eines Physikers. Einige der Bilder, insbesondere aus Kapitel 1 und Kapitel 2, stammen aus meinem firmeninternen Fortbildungsseminar zum Thema „Modelling & Simulation“, für deren Verwendung ich Dr. Alain Schumacher recht herzlich danken möchte. Die Durchführung zahlreicher internationaler Fortbildungsprogramme über naturwissenschaftliches Arbeiten im industriellen Umfeld lieferten nicht nur einen Teil der Motivation, sondern auch wichtige Beiträge für dieses Buch. Bei diesen Lehrveranstaltungen wurde über einen Zeitraum von mehr als 15 Jahren so manche Verständnishürde aus Forschung und Lehre mit dem jeweiligen Teilnehmerfeld aus Naturwissenschaft und Technik nicht nur erkannt und diskutiert, sondern auch erfolgreich aufgearbeitet, sodass ich selbst so manches dabei lernen konnte. Insofern gilt mein Dank allen Teilnehmern, die mit ihrem *Fragemut* hierzu beigetragen haben. Nicht zuletzt möchte ich meinen Kollegen des *Basics & Simulation-Teams* danken, für die langjährige und stets konstruktive und spannende Zusammenarbeit, bei der wir gemeinsam zahlreiche F&E-Probleme aus Physik und Technik haben lösen können. Ein herzliches Dankeschön geht insbesondere an Dr. Una Karahasanovic für ihre Anregungen und Hinweise bei der Durchsicht des Manuskripts. Auch möchte ich mich beim Carl Hanser Verlag für die Bereitschaft bedanken, dieses Buch in das verlagseigene Wissenschaftsprogramm aufzunehmen. Natalia Silakova und Christina Kubiak gilt mein Dank für ihre Un-

terstützung und kompetente Betreuung bei der abschließenden Erstellung der Buchvorlage.

Eine wissenschaftliche Ausarbeitung bleibt ohne eingehende Literaturrecherche doch zumindest lückenhaft. In diesem Fall hatte die Corona-Pandemie auch positive Auswirkungen. Viele internationale Bibliotheken und Zeitschriftenverlage erlaubten einen kostenlosen Online-Zugriff auf einen Großteil ihrer historischen und z. T. auch zeitgenössischen Dokumente. Eine dankenswerte Initiative, die zumindest im Falle historischer Quellen auch beibehalten werden sollte! Die digitalen Bibliotheken JSTOR oder NUMDAM gehen hier beispielhaft voran. In diesem Zusammenhang ist auch der Preprint-Dokumentenserver <http://www.arxiv.org> zu nennen. Die Qualität der dort eingestellten und von mir zitierten Publikationen ist durchweg von hoher wissenschaftlicher Aussagekraft, auch ohne den üblichen Peer-Review-Prozess durchlaufen zu haben – eine unterstützenswerte Initiative, die es insbesondere Schülern und Studenten ermöglicht, schnell und kostenlos auf aktuelle Forschungsarbeiten zuzugreifen. Auch das Wikipedia-Projekt (<http://de.wikipedia.org>) sei an dieser Stelle erwähnt. Die Qualität vieler Artikel ist mittlerweile recht hoch und darin aufgeführte Referenzen dokumentieren zudem eine fundierte Literaturrecherche, weshalb ich gelegentlich auch auf lesenswerte Wikipedia-Einträge verweise – guten Gewissens und entgegen üblicher und z. T. überholter wissenschaftlicher Gepflogenheiten.

Anmerkungen

- ¹ William Lawrence Bragg (1890 – 1971), englischer Physiker und Nobelpreisträger (1915). Originalzitat: „The fun in science lies not in discovering facts, but in discovering new ways of thinking about them.“ Aus L. Bragg, *A Short History of Science: Origins and Results of the Scientific Revolution*, chapter XV, The Atom, Doubleday (1959), S. 124; zitiert in R. Shour, *Sir Lawrence Bragg's quote on the essence of science*, Researchgate (2019).

Inhalt

Vorwort	VII
----------------------	------------

À Propos	1
-----------------------	----------

1 Modelle in der Physik	9
--------------------------------------	----------

1.1 Modellierungskonzepte	13
---------------------------------	----

1.2 Definition und Abstraktionsebenen eines Modells	15
---	----

1.3 Modelleigenschaften und Modellierungsziele	22
--	----

1.4 Ein Modellierungsleitfaden	25
--------------------------------------	----

1.5 Potential, Grenzen und Risiken der Modellierung	29
---	----

2 Mathematische Strukturen in der Physik	43
---	-----------

2.1 Der mathematische Abbildungsprozess	44
---	----

2.2 Physikalische Gleichungen	51
-------------------------------------	----

2.3 Die mathematische Symmetrie	55
---------------------------------------	----

2.4 Die mathematische Analogie	58
--------------------------------------	----

2.5 Die mathematische Dualität	60
--------------------------------------	----

3 Der Messprozess und Maßeinheiten	65
---	-----------

3.1 Die Festlegung der Naturkonstanten	70
--	----

3.2 Die Längenmessung	71
-----------------------------	----

3.3 Die Massenbestimmung	73
--------------------------------	----

3.4 Die Zeitmessung	74
---------------------------	----

4	Grundlegende physikalische Konzepte.	81
4.1	Das Konzept der Energie	82
4.1.1	Was ist Energie?	84
4.1.1.1	Die Energie – eine physikalische Beschreibung	85
4.1.1.2	Die Koenergie oder Duale Energie	90
4.1.2	Was ist Entropie?	94
4.1.2.1	Der klassische (historische) Entropiebegriff	97
4.1.2.2	Eine zeitgemäße Interpretation der Entropie	103
4.2	Das Konzept der Kraft	119
4.2.1	Die Newton'sche Mechanik	123
4.2.2	Die Analytische Mechanik	138
4.2.3	Die Kontinuumsmechanik.	145
4.2.3.1	Der kartesische Spannungstensor	147
4.2.3.2	Der kartesische Verzerrungstensor	150
4.2.3.3	Materialeigenschaften	151
4.2.3.4	Die Bilanzgleichungen	153
4.2.4	Die Quantenmechanik	155
4.2.4.1	Randerscheinungen in der Physik um 1900.	156
4.2.4.2	Erste quantenmechanische Modell-Ansätze	157
4.2.4.3	Erste grundlegende Experimente zur Quantenmechanik	158
4.2.4.4	Der quantenmechanische Kraftbegriff.	161
4.3	Das Konzept der Zeit	162
4.3.1	Was ist Zeit?	163
4.3.2	Die Zeit als Messgröße	165
4.3.3	Entropie und die Richtung der Zeit	169
4.3.4	Das Kausalitätsproblem in der Physik.	173
4.3.5	Zeit-Paradoxien.	176
4.3.5.1	Die Spezielle Relativitätstheorie: Eine kurze Einführung	177
4.3.5.2	Zeitreisen in die Zukunft: Das Zwillingsparadoxon	188
4.3.5.3	Zeitreisen in die Vergangenheit: Das allgemeine Kausalitätsprinzip	191

4.4	Das Konzept des Raumes.	196
4.4.1	Was ist Raum?	197
4.4.2	Inertialsysteme und Bewegung im Raum	203
4.4.3	Die Vermessung des Raumes	210
4.4.4	Das kosmologische Paradoxon – Kann Raum bewegt werden?	220
4.4.5	Ein kosmologisches Modell.	237
4.4.5.1	Das erweiterte Relativitätsprinzip	241
4.4.5.2	Zeit und Raum nach Milne	242
4.4.5.3	Das Milne-Universum.	251
4.4.5.4	Lokale Beschleunigungen und Gravitationskräfte	254
4.4.5.5	Die Lichtablenkung im Gravitationsfeld	263
4.4.5.6	Milne und das Olbers-Paradoxon	268
4.4.5.7	Zusammenfassung	271
5	Impulsströme	293
5.1	Der allgemeine Impulserhaltungssatz	295
5.2	Kontaktwechselwirkungen	299
5.2.1	Die allgemeine Kontinuitätsgleichung.	301
5.2.2	Die Reibung	302
5.2.3	Das Hebelgesetz	312
5.2.4	Beispiele zur Impulsstrom-Mechanik	316
5.2.4.1	Ein Vergleich: mechanische Spannung vs. elektrische Stromdichte.	317
5.2.4.2	Die Bewehrungstechnik im Bauingenieurwesen.	320
5.2.4.3	Das Boussinesq-Problem	324
5.2.4.4	Tragwerke	326
5.2.4.5	Verbundmaterialien	328
5.2.4.6	Granulare Materie	330
5.2.4.7	Die Sanduhr	334
5.2.4.8	Spannungsinduzierte Bewegung	336
5.2.5	Stoßvorgänge	349
5.2.5.1	Die Stoßzeit	353
5.2.5.2	Die Stoßkaskade	363

5.3	Feldwechselwirkungen	366
5.3.1	Das Gravitationsfeld.	367
5.3.1.1	Der Gravitations-Plattenkondensator	374
5.3.1.2	Geophysik: über den Wärmehaushalt der Erde.	379
5.3.1.3	Zusammenfassung	391
5.3.2	Das magnetische Feld	394
5.3.3	Das elektrische Feld.	398
5.3.4	Der Maxwell'sche Spannungstensor	401
5.3.4.1	Der Feldimpuls	403
5.3.4.2	Die Maxwell-Heaviside-Gleichungen	407
5.3.5	Die elektromagnetische Dualität	409
6	Résumé.	419
7	Physikalische Größen	425
8	Aufgaben	427
9	Mathematischer Anhang	441
9.1	Vektoren	442
9.2	Tensoren	443
9.3	Vektor- und Tensoranalysis.	445
9.4	Impulsströme in der Kontinuumsmechanik	449
10	Zitate.	455
11	Glossar	465
12	Verweise.	479
13	Weiterführende Literatur	483
	Index	493

À Propos

SCIENTIFIC EDUCATION:

The problem [in education] is not people being uneducated. The problem is that people are educated just enough to believe what they have been taught, and not educated enough to question anything from what they have been taught.

*Richard Feynman*¹

Dieses Buch befasst sich mit den Grundzügen der physikalischen Modellierung und der Vielzahl an Fragen, die erfahrungsgemäß damit verbunden sind:

- Was sind physikalische Modelle und was macht man damit?
- Wie erstellt man ein solches Modell und was ist hierbei im Einzelnen zu beachten?
- Welche Vorteile und welche Grenzen und Risiken sind mit der Modellierung physikalischer Phänomene aus unserer Erfahrungswelt verknüpft?
- Gibt es in diesem Zusammenhang eigentlich „wahre“ Modelle?
- Wenn ja, woran erkenne ich dann „unwahre“, soll heißen „falsche“ Modelle?
- Hatte etwa Newton mit seiner richtungsweisenden *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* letztlich doch „Unrecht“ und sind demzufolge Einsteins *Relativitätstheorien* „rechters“?
- Wie sind physikalische Modellgrößen und Modellgesetze diesbezüglich eigentlich einzuordnen?
- Was versteht man in der Physik beispielsweise unter dem Modellbegriff *Energie* und wieso braucht es unbedingt die *Entropie*?
- Gibt es *Kräfte* „wirklich“ oder haben wir es vielmehr mit *Impulsströmen* zu tun?
- Wie lässt sich entscheiden, ob eine Modellvorstellung tatsächlich „stimmt“?
- Lassen sich hierfür geeignete objektive Kriterien finden?
- u. v. m.

Ein Fragenkatalog, der sich beliebig erweitern ließe und dennoch beschäftigt sich die naturwissenschaftliche Ausbildung nur in den seltensten Fällen, sei es einführend in der gymnasialen Oberstufe oder auch später detailliert auf der Universität, mit diesen wichtigen Grundsatzthemen. Im Gegenteil, sie werden oftmals lapidar abgehandelt, indem man mehr oder weniger plausibel erscheinende Erläuterungsversuche seitens Dritter unreflektiert übernimmt. Im Wesentlichen spiegeln all diese Fragen eine entscheidende Unschlüssigkeit wider, nämlich:

„Wie(so) »funktioniert« eigentlich die Naturwissenschaft Physik?“

Was genau tun wir Physiker, wenn wir versuchen etwas Ordnung in die phänomenologische Vielfalt unserer Erfahrungswelt zu bringen? Was für eine Art von Wissen schafft die Physik? Ich möchte von mir behaupten, „*Physiker aus Leidenschaft*“ zu sein, und sollte deshalb gleich zu Beginn eine allgemein verbreitete Wunschvorstellung in Sachen Naturwissenschaft korrigieren und zum Ausdruck bringen, was Physik *definitiv* nicht ist: Die Physik ist keine Wissenschaft, die uns eine *objektive Beschreibung* der Natur ermöglicht, wovon man übrigens Ende des 19. Jahrhunderts noch felsenfest überzeugt war! Sie ist bestenfalls eine *Darstellung unserer Vorstellung von der Natur*², unseres *subjektiven Wissens* oder was wir diesbezüglich oftmals *glauben* zu wissen. Niels Bohr beschrieb diesen Sachverhalt mit den folgenden Worten:

„*Indeed from our present standpoint, physics is to be regarded not so much as the study of something a priori given, but as the development of methods for ordering and surveying human experience.*“³

Um einen besseren Einblick in die Arbeitsweise der Physik zu vermitteln, werde ich u. a. am Beispiel zweier Modell-Konzepte zu beschreiben versuchen, wie die Physik methodisch vorgeht, um Naturphänomene zu „*verstehen*“. Das heutzutage scheinbar „*wohlverstandene*“ Newton'sche Konzept „*wirkender Kräfte*“ wird dem „*recht unverständlichen*“ Konzept „*strömender Impulse*“ gegenübergestellt und es wird sich hierbei zeigen, um dies vorwegzunehmen, dass es mit dem physikalischen Verständnis so seine Bewandnis zu haben scheint, denn das Impulsstrom-Konzept ist der schlüssigere, weil widerspruchsfreie Ansatz für eine konsistente (nicht nur klassische) Naturbeschreibung! Thematisch beschränkt sich dieses Buch auf Problemfelder aus der klassischen Physik. Abgesehen von einem kleinen Ausflug in die Quantenmechanik, werden inhaltlich relevante Aspekte der großen Kontinuum-Theorien aus der Mechanik, der Elektrodynamik und der Thermodynamik behandelt.

Bei der Literaturrecherche zu diesem Buch bestätigte sich einmal mehr ein bemerkenswerter Sachverhalt (natur-)wissenschaftlicher Arbeit: Das „*Wissen schaffende Rad der Physik*“ wurde und wird in unserer Welt immer wieder aufs Neue erfunden, soll heißen, grundlegende Gedanken, Ideen oder Interpretationen zu wissenschaftlichen Themen werden *niemals* nur von *einer* Person, an *einem* Ort (etwa im stillen Kämmerlein) und zu *einem* bedeutsamen Zeitpunkt (der besagten Sternstunde) erdacht und für die Nachwelt dokumentiert (weil ansonsten unwiederbringlich verloren) – das sind *Wissenschaftsmärchen*! Ganz im Gegenteil, ein bewährtes wissenschaftshistorisches Prinzip besagt, dass *kein* Naturwissenschaftler im Alleingang „*Wissen schafft*“, d. h. neue und die Wissenschaft bereichernde Ideen in lehrbuchreifer Form alleine hervorbringt.⁴ Es gab oder gibt in der Wissenschaftsgemeinde stets Forscher, die auf derselben naturwissenschaftlichen Fragestellung arbeiten oder bereits gearbeitet haben und deren Resultate bzw. Über-

legungen entscheidend zur Lösung der eigenen aktuellen Problemstellung beitragen können. Zu jedem einzelnen Fachgebiet gibt es gerade deshalb eine Fülle ausgezeichneter zeitgenössischer, aber auch historischer Literatur, sowohl in Form von Lehrbüchern und wissenschaftlichen Publikationen als auch von im Netz frei verfügbaren Artikeln oder didaktisch kompetent ausgearbeiteten Skripten zu Vorlesungsveranstaltungen, auf die ich bei der Anfertigung dieses Buches verschiedentlich zurückgegriffen habe, um die mir wichtigen Gesichtspunkte zum Thema eingehender darzulegen und worauf an entsprechender Stelle verwiesen wird. Die zugehörigen Links zu Referenzen aus dem Internet werden ebenfalls aufgeführt (Stand: Oktober 2023). Die wissenschaftliche Ausarbeitung dieses Buches ist also ganz im Sinne Eugen Roths verfasst, wie er es seinerzeit im Vorwortgedicht zu einem seiner Bücher auf humorvolle Weise zu beschreiben vermochte:

„[...]

Die Wissenschaft, sie ist und bleibt,

Was einer ab vom andern schreibt.

Doch trotzdem ist, ganz unbestritten,

sie immer weiter fortgeschritten“⁵

Selbstverständlich wird mit diesem Buch nicht einfach nur irgendwo irgendetwas abgeschrieben, obgleich der Text tatsächlich nichts grundsätzlich Neues beschreibt! Vielmehr wird allgemein Bekanntes aus Physik und Technik in einen nach meiner Auffassung schlüssigeren, weil konsistenten naturwissenschaftlichen Kontext gesetzt, sodass sich so manche wissenschaftliche Ungereimtheit auf einfache Weise darstellen und in der Folge auch widerspruchsfrei auf- bzw. erklären lässt.

Erfahrungsgemäß können Links im Internet recht kurzlebig sein, sodass der interessierte Leser die zugehörige Literatur zudem auch auf der IPR-Homepage zusammengestellt finden und darüber frei verfügen kann, sofern keine weiteren urheberrechtlichen Einschränkungen bestehen sollten. Trotz aller Sorgfalt bei der Literaturrecherche kann ich nicht ausschließen, weitere thematisch relevante Beiträge übersehen bzw. schlicht aus Unkenntnis nicht berücksichtigt zu haben.

„[...]

Drum eins: seid nicht gleich ergrimmt,

Wenn irgendwas bei mir nicht stimmt,

Weil es an Wissen mir gebrach –

Schlagt halt im großen [Physik-Standardwerk] nach!“⁵

Entsprechende Hinweise, Anmerkungen oder Korrekturvorschläge werden gerne entgegengenommen.

Zum Aufbau des Buches

Das Buch beschreibt, was ich als Erstsemester sehr gerne über Physik erfahren hätte, jedoch der Lehralltag einer Universität wohl auch noch heutzutage nur sporadisch zu vermitteln scheint, zumindest nach meinen Erfahrungen. In Kapitel 1 *Modelle in der Physik* werden die mir wichtigen Gesichtspunkte zum physikalischen Modellbegriff zusammengefasst und anhand einiger Beispiele eingehender erläutert. Anschließend skizziert Kapitel 2 *Mathematische Strukturen in der Physik* den mathematischen Abbildungsprozess Physik $\leftrightarrow$ Mathematik und stellt in diesem Zusammenhang drei mathematische Strukturelemente vor, die in der theoretischen Physik eine besondere Rolle spielen: Die Symmetrie, die Analogie und die Dualität. Das Wissen um diese Strukturen erleichtert ganz wesentlich die Behandlung vieler physikalischer Problemstellungen aus unterschiedlichsten Disziplinen. Nachdem die prinzipielle Anwendbarkeit einer Modellvorstellung *einzig* auf experimentellem Wege geprüft werden kann, geht Kapitel 3 *Der Messprozess und Maßeinheiten* auf den physikalischen Messprozess und die Definition von geeigneten Maßeinheiten ein, denn nicht selten sind damit recht hartnäckige Anschauungsprobleme verbunden. Beispielsweise verknüpft man mit der Festlegung einer bestimmten Maßeinheit gerne ein spezifisches physikalisches Phänomen und folgert fast zwangsläufig, dass unterschiedliche Einheiten phänomenologisch stets unterschiedliche physikalische Qualitäten beschreiben müssen – dem ist aber nicht so. Im Anschluss werden in Kapitel 4 *Grundlegende physikalische Konzepte* fünf gewichtige physikalische Modellvorstellungen vorgestellt und die z.T. erheblichen Schwierigkeiten diskutiert, die mit diesen Überlegungen immer noch verbunden sind: die uns scheinbar so geläufige *Energie* und etwas eingehender die (weil häufig weniger vertraute) *Entropie*, die allen gleichsam bekannte *Kraft*, der wohl eher problematisch zu nennende Begriff der *Zeit* und zuletzt der uns umgebende und nicht weniger problematische *Raum*.

- Die einführende Diskussion der *Konzepte zur Energie/Entropie* soll in erster Linie auf eine Reihe signifikanter Fehlinterpretationen und Missdeutungen aufmerksam machen, die im Rahmen der physikalischen Lehre üblicherweise so anfallen, weil zur „*Erklärung*“ der Konzepte oftmals auf Alltagserfahrungen oder Analogien zurückgegriffen wird, die in den seltensten Fällen schlüssig sind und deshalb auch nur bedingt den physikalischen Sachverhalt sinnvoll wiedergeben können.
- Ähnliches gilt für die Kraft. Die bestehenden prinzipiellen Schwierigkeiten in Verbindung mit dem physikalischen *Konzept der Kraft* werden meines Erachtens umso deutlicher, beleuchtet man den Kraftbegriff im Rahmen verschiedener mechanischer Modellansätze. Entsprechend wird „*die Kraft*“ nicht nur im ursprünglichen Bild der *Newton'schen Mechanik*, sondern auch aus Sicht der *Analytischen Mechanik*, der *Kontinuumsmechanik* und – wenn auch nur kurz – aus der Perspektive der *Quantenmechanik* besprochen. Auf diese Weise sollten

sich althergebrachte wissenschaftliche Glaubensbekenntnisse bzw. Gewohnheiten leichter erkennen und ausräumen lassen.

- Mit dem *Konzept der Zeit* sind gleich eine ganze Reihe grundsätzlicher Fehleinschätzungen verbunden. Die Analyse des physikalischen Zeitbegriffs erfordert deshalb eine gewissenhafte Betrachtung sowohl der Messgröße „*Zeit*“ als auch der damit verknüpften Problematik einer „*Zeitrichtung*“ und darauf aufbauend des „*Kausalitätsproblems*“ in der Physik. Abschließend wird die Physik vermeintlicher „*Zeit-Paradoxien*“ besprochen – notwendigerweise, denn es gibt sie nicht! Hierfür bedarf es u. a. einer kurzen Einführung in die spezielle Relativitätstheorie.
- Das *Konzept des Raumes* ist nicht weniger heikel, weil verbunden mit „*allzu vertrauten Erfahrungstatsachen*“ die wir bereits von Kindesbeinen an erlernen und in einer Weise verinnerlichen, dass es vielen vermutlich schwerfallen mag, sich wenigstens z. T. von diesem traditionellen Denken zu lösen, um alternativen Modellvorstellungen „*etwas Raum zu geben*“. Der physikalische Begriff des Raumes ist eng verknüpft mit dem Phänomen Bewegung, insbesondere mit beschleunigter Bewegung, weshalb auch „*die Zeit*“ bei der Definition und der Vermessung physikalischen Raumes die entscheidende Rolle spielt. Tatsächlich ist die Messgröße „*Zeit*“ grundlegender als die physikalische Längenmessung. Deshalb soll abschließend ein (fast) in Vergessenheit geratenes kosmologisches Modell vorgestellt werden, das einzig auf der Zeitmessung beruht und in der Folge kosmologische Zusammenhänge deutlich einfacher zu beschreiben vermag als derzeit akzeptierte Standardmodelle, inklusive der aus den Relativitätstheorien bekannten Gesetzmäßigkeiten. Insbesondere stützt das Modell auf kosmologischer Ebene die Vorstellung von Impulstransportprozessen und liefert diesbezüglich auch eine plausible Erklärung für die Sonderrolle der „*Gravitationskraft*“ im Reigen der physikalischen „*Grundkräfte*“.

Mit der eingehenden Betrachtung dieser uns scheinbar doch so vertrauten Größen aus Physik und Technik sollten die damit verknüpften Probleme deutlich werden und damit der Einstieg in Kapitel 5 umso leichter fallen: Das einst von Max Planck vorgeschlagene *Konzept des Impulsstroms* und damit verbunden die Fülle an Phänomenen, die sich nur mithilfe dieser Modellvorstellung auf *einfachste Weise* beschreiben lassen, wie z. B. die Physik der Reibung, das Hebelgesetz, Stoßvorgänge, die mechanischen Eigenschaften von Verbundmaterialien, granulares Materialverhalten, spannungsinduzierte Bewegungsvorgänge, allgemeine Feld-Materie-Wechselwirkungen u. v. m.

Motivation: Neben der Vermittlung mir wichtiger Aspekte zum physikalischen Modellverständnis, soll die kritische Analyse der für die Physik so wesentlichen Modellvorstellungen den Leser dazu ermutigen eventuelle Verständnisfragen zu naturwissenschaftlichen Themen stets selbstbewusst anzusprechen. Schließlich gibt es diesbezüglich keine „*dumme Fragen*“, schlimmstenfalls bestätigt die eine

oder andere „*flapsige Antwort*“ vermeintlicher Experten, dass die vorgebrachten Bedenken mehr als nur gerechtfertigt sind, denn

„Man kann sich selbst auf dümmste Sachen

*Bisweilen einen Reim noch machen.“*⁶

um so manchen naturwissenschaftlichen *faux pas* in der physikalischen Lehre humorvoll zu umschreiben. Keines der in diesem Buch diskutierten wissenschaftlichen Konzepte ist „*zweifelsfrei wahr*“ und deshalb anstandslos zu akzeptieren und mag es noch so erfolgreich sein. Womöglich sind Ihre Bedenken ein erster Puzzlebaustein zu neuer Physik, wer weiß – also immer raus damit!

Mathematik: Wie theoretisch wird es werden, wie viel Mathematik wird gebraucht? Gewisse mathematische Vorkenntnisse werden vorausgesetzt. Sie beschränken sich im Wesentlichen auf die Differential-/Integralrechnung in drei Dimensionen, die zugehörigen Integralsätze und etwas Tensor-Rechnung. Zur Orientierung sind die entsprechenden Grundlagen im mathematischen Anhang zusammengestellt. Als „*Leistungskursler*“ bzw. „*Erstsemester*“ in Physik/Mathematik sollte man damit zurechtkommen, so hoffe ich (Rückmeldungen hierzu sind erwünscht). Insgesamt 151 Abbildungen ergänzen die Ausführungen im Text und sollen auf diese Weise zu einem leichteren Verständnis der jeweiligen physikalischen Zusammenhänge beitragen. Die formale mathematische Schreibweise folgt DIN 1338, d. h. physikalische Größen wie etwa die Geschwindigkeit v , die Masse m oder der Drehimpuls L werden grundsätzlich kursiv dargestellt. Entsprechende vektorielle Größen $\mathbf{v}$, $\mathbf{L}$, etc. werden fett und kursiv gesetzt und tensorielle Größen $\hat{\sigma}$ erhalten zur Unterscheidung zusätzlich ein Kapitälchen. Mathematische Zeichen mit feststehender Bedeutung sowie physikalische Einheiten stehen hingegen gerade, z. B. **div**, **lim**, **tan** bzw. **m** (Meter), **C** (Coulomb) oder **s** (Sekunde). Im Text zusätzlich aufgeführte physikalische Maßeinheiten stehen stets in eckigen Klammern, z. B. Länge [m], elektrische Ladung [C] oder Zeit [s]. In den Bildern stehen hingegen sämtliche Formelzeichen der besseren Lesbarkeit wegen grundsätzlich gerade.

Zitate und Sprachgebrauch: Zitierte Textstellen sind, soweit möglich, der jeweiligen Originalliteratur entnommen und genügen der zu jener Zeit üblichen Rechtschreibung, was zuweilen ungewohnt erscheinen mag.

„Entsprechende Textpassagen sind auf diese Weise formatiert. Die zugehörige Quelle wird in einer Endnote aufgeführt⁷ [zu Verständniszwecken hinzugefügte Ergänzungen stehen jeweils in eckigen Klammern].“

Bisweilen finden sich auch Auszüge zitierter Textstellen „*entsprechend hervorgehoben im Text selbst*“ oder Inhalte bzw. Aussagen Dritter werden sinngemäß wiedergegeben mit anschließender Nennung der jeweiligen Referenz, sei es in der Form (Autor) oder (Autor, Jahr) und in Abschnitt 12 *Verweise* im Detail aufgelistet oder auch als Quellenangabe⁷ in einer weiteren Endnote benannt und jeweils am Schluss eines jeden Kapitels aufgeführt, zusammen mit weiteren thematisch ergänzenden

Anmerkungen zum jeweiligen Text. Gelegentlich wird auch auf eine ausführlichere Textstelle mit **Z_n** verwiesen, welche in Abschnitt 10 *Zitate* nachgelesen werden kann.

In Sachen Sprachgebrauch vs. Sprachverständnis folge ich nicht dem aktuellen „Trend“ das generische Maskulinum oder das generische Femininum „gendergerecht“ zu ersetzen, nicht nur aus Gründen der besseren Lesbarkeit. Im Buch beziehe ich mich verschiedentlich auf Schüler, Studenten, Physiker, Mathematiker, Ingenieure, u. v. m. und gehe selbstverständlich davon aus, dass *alle* Geschlechter die genannten *Ausbildungsgänge* und *Berufsbilder* in vergleichbarer Weise erfolgreich zu gestalten wissen.

Referenz: Wesentliche Aspekte dieses Buches gehen auf die inspirierenden Arbeiten von Prof. G. Falk, Prof. F. Herrmann und Prof. G. Job zurück, u. a. zusammengestellt im sogenannten **Karlsruher Physik-Kurs (KPK)**.⁸ Zudem lieferte meine mehr als 15-jährige Erfahrung bei der Durchführung internationaler Fortbildungsseminare über naturwissenschaftliches Arbeiten im industriellen Umfeld wichtige Beiträge für dieses Buch. Bei diesen Lehrveranstaltungen wurde so manche Verständnishürde aus Forschung und Lehre mit dem Teilnehmerfeld aus Naturwissenschaft und Technik erfolgreich aufgearbeitet.

Abschließend sei nochmals Eugen Roth zitiert:

*Der Leser, traurig, aber wahr,
Ist häufig unberechenbar:
Hat er nicht Lust, hat er nicht Zeit,
Dann gähnt er: »alles viel zu breit!«
Doch wenn er selber etwas sucht,
Was ich, aus Raumnot, nicht verbucht,
Wirft er voll Stolz sich in die Brust:
»Aha, das hat er nicht gewusst!«
Man weiß, die Hoffnung wär' zum Lachen,
Es allen Leuten recht zu machen.“⁵*

Deshalb habe ich für alle, die thematisch noch etwas mehr erfahren möchten, in Kapitel 13 *Weiterführende Literatur* eine Reihe von Publikationen zusammengestellt und kurz kommentiert – ein kleiner Auszug aus meiner „*persönlichen Favoritenliste*“.

Ich wünsche allen Lesern viel Spaß mit der Lektüre und erhoffe mir zahlreiche Fragen und Anregungen, ob nun zufrieden oder unzufrieden mit den Ausführungen in diesem Buch, auf dass Ihre Beiträge die hier dargestellten Zusammenhänge sinnvoll ergänzen mögen!

Entsprechende Rückmeldungen bitte ich an WBi.IPR-Mail@t-online.de zu senden.

Werner Bieck, Wiltingen im Oktober 2023

Anmerkungen

- 1 Richard Phillips Feynman (1918 – 1988), amerikanischer Physiker und Nobelpreisträger (1965).
- 2 siehe Ernst Peter Fischer, *Die andere Bildung – Was man von den Naturwissenschaften wissen sollte*, Ullstein Verlag, 2003, S.162 ff.
- 3 Niels Henrik David Bohr (1885 – 1962), dänischer Physiker und Nobelpreisträger (1922). N. Bohr, *Essays 1958–1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, Ox Bow Press, Woodbridge, CT (1987), S.10; zitiert in *Physics Today* **57**, 2, 10 (2004), <http://doi.org/10.1063/1.1688051>.
- 4 aus K. Simonyi, *Kulturgeschichte der Physik*, Verlag Harri Deutsch, 2001, S.397.
- 5 Eugen Roth (1895 – 1976), deutscher Lyriker. Zitate aus *Eugen Roths Großes Tierleben*, Vorwortgedicht „Zum Geleit“, Absätze 3 bzw. 4, S.5 f., Nikol Verlagsgesellschaft, Hamburg, 2006 (siehe auch Zitat **Z₀**); Lizenzausgabe: Carl Hanser Verlag, München, 1989. Die Einzelausgaben *Tierleben*, *Band 1 und 2* wurden erstmals in den Jahren 1948/49 publiziert.
- 6 Horst Lachmund, *Aus dem Hirn geschüttelt*, Gedichte & Betrachtungen, Trier (2020).
- 7 Quellenangabe zum Zitat. Sämtliche in diesem Buch aufgeführten Text- und Bild-Zitate genügen §51 des deutschen Urheberrechtsgesetzes.
- 8 siehe <http://www.karlsruher-physikkurs.de/> sowie die Hinweise in Kapitel 13 *Weiterführende Literatur*.

Modelle in der Physik

„Bei dem Versuch die Fülle von Beobachtungen mithilfe eines Modells zu beschreiben, nutzt der Wissenschaftler ein ganzes Arsenal an Konzepten und ist sich sehr selten der Tatsache bewusst, wie unendlich problematisch diese Vorstellungen sind. Er verwendet diese Ideen als etwas Selbstverständliches, als etwas mit objektivem Wahrheitsgehalt, welcher nicht ernsthaft angezweifelt werden kann.“

Albert Einstein¹

Naturwissenschaftliches Arbeiten ist Modellierung. Seit den Anfängen der modernen experimentellen Physik, häufig namentlich verbunden mit den Studien Galileo Galileis² zu Gesetzmäßigkeiten der Mechanik, wurde bis heute mithilfe der Mathematik eine komplexe und vielschichtige Modellwelt geschaffen. Diese mathematischen Modelle dienen der Beantwortung von Fragen nach dem *Wie*: Sie beschreiben, *wie* sich Dinge verhalten, *wie* Phänomene der Erfahrungswelt in Beziehung zueinander stehen. Mit diesem Wissen lässt sich planerisch vorgehen, d.h. zukünftiges Verhalten vorhersagen. Eine praktische Sache, wenn man z.B. eine stabile und tragfähige Brücke bauen möchte oder ein Flugzeug konstruieren möchte, das auch abheben, fliegen und sicher wieder landen kann. Hierfür ist *Know-how* gefragt, also das Wissen um das *Wie*. Weitergehende *klärende* Fragen nach dem *Warum* sind hierfür nicht relevant und können in der Physik auch nicht beantwortet werden. Das *Warum* sucht nach einem tieferen philosophischen Grund, gewissermaßen nach dem „meta-physikalischen Motiv“, *weswegen* sich die Dinge wie beobachtet verhalten. Im wissenschaftlichen Kontext bedeuten *Erklärungen* jedoch nur, dass man Phänomene mithilfe eines Modells auf wenige grundlegende Prinzipien zurückführen und hierüber klassifizieren kann. „*Wo das [so gewonnene] Wissen aufhört, beginnt der Glaube*“³ an Aspekte *jenseits* der Physik (→ der *Meta-Physik*) – in unterschiedlichster Ausprägung.

Bild 1.1 soll exemplarisch die historische Entwicklung physikalischer Modelle (→ Theorien) skizzieren, allesamt basierend auf Beobachtungen, darauf aufbauenden Erfahrungen sowie weiterführenden spezifischen Untersuchungen. Selbstverständlich, und entgegen dieser kurzen und stark vereinfachten Darstellung, waren und sind die Wissen schaffenden Entwicklungsprozesse physikalischer Theorien keineswegs eine geradlinige und zielorientierte Erfolgsgeschichte menschlicher Vernunft. Im Gegenteil, sie gingen einher mit zahlreichen Irrungen und Wirrungen, mit Fakten negierenden Glaubensbekenntnissen, mit Stagnation und Rückschritt, zuweilen gefolgt von überraschenden, weil zufälligen Wendungen, die erst

so manchen Ausweg aus wissenschaftlichen Sackgassen ermöglichten, bis die Modellvorstellungen zu unterschiedlichsten Aspekten der Erfahrungswelt letztendlich *den* tragfähigen und detailreichen Entwicklungsstand unserer heutigen Zeit erreichten – allerdings ohne jegliche Gewähr, dass wir uns nicht hier und da wieder einmal auf einem dieser „*wissenschaftlichen Holzwege*“ befinden.⁴ Eine umfassende Darstellung zur geschichtlichen Entwicklung der Physik findet sich beispielsweise in (Simonyi, 2001).

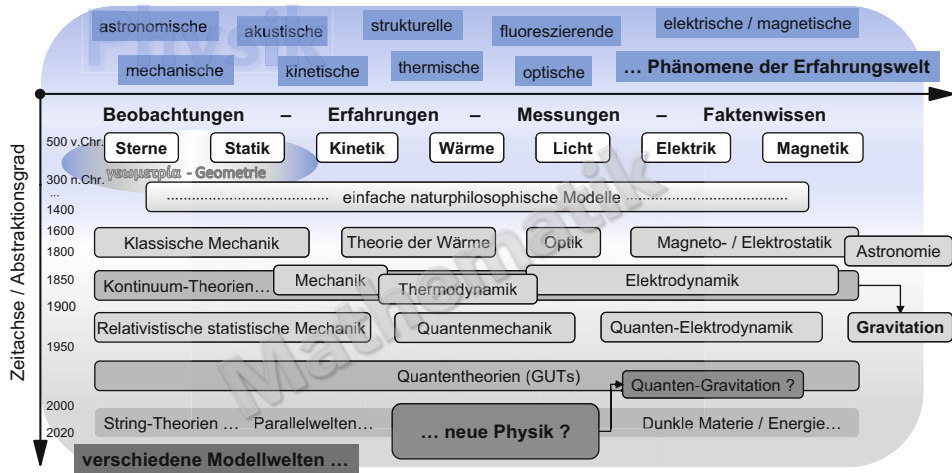


Bild 1.1 Schematische Darstellung zur zeitlichen Entwicklung physikalischer Modelle, motiviert aus der Erfahrungswelt des Menschen. Die sogenannte „*Wissenschaftliche Revolution*“ in Europa begann etwa im 16. Jahrhundert und benötigte mehr als 200 Jahre, um das bis dato etablierte religiös-traditionelle Denken zu überwinden.

Das gesammelte frühe Faktenwissen führte zwangsläufig zu einer ersten Gliederung der beobachtbaren Phänomene in Teilbereiche, welche zu jener Zeit augenscheinlich nichts miteinander gemein hatten. Es gab zahlreiche Erfahrungswerte aus dem Bereich der Sternenkunde und der Mechanik (→ Statik), Beobachtungen zur Bewegung (→ Kinetik), Erfahrungen in Verbindung mit Wärme, zu Lichterscheinungen sowie solche zu magnetischen und elektrischen Erscheinungen etc. Erste naturphilosophische Modellvorstellungen suchten nach Ordnung in dieser Vielfalt des Naturgeschehens. Im antiken Griechenland erzielte man mithilfe der Geometrie anfänglich bemerkenswerte Erfolge in diesem Bemühen. Aber erst mit der Entwicklung geeigneter analytischer Methoden, wie etwa der Infinitesimalrechnung oder der Vektoranalysis, war es möglich, Modelle formal zu beschreiben und Phänomene der Erfahrungswelt erfolgreich in entsprechende Bereiche der Mathematik abzubilden. Die ursprüngliche phänomenologische Gliederung wurde hierbei weitestgehend beibehalten. Es entstanden so physikalische Disziplinen, wie die *Klassische* oder *Analytische Mechanik*, die *Wärmelehre*, die *Optik* sowie die

Elektro- und Magnetostatik. Kontinuumsansätze, die mögliche Substrukturen in der phänomenologischen Welt außer Acht lassen, ermöglichten ausgesprochen tragfähige und weitreichende Theorien zur Beschreibung bestimmter Teilaspekte unserer Welt, wie die *Kontinuumsmechanik*, die *Thermodynamik* und die *Elektrodynamik*.

Es zeigte sich auf diesem Wege, dass ursprünglich als qualitativ verschieden angenommene Phänomene der gleichen Modellvorstellung genügen können. Mit der Einführung weiterer Substrukturen zur Beschreibung der Materie entstanden in der Folge die *Statistische Mechanik* und die *Quantenmechanik*, und diese Entwicklung der Erweiterung bestehender oder der Schaffung neuer physikalischer Modelle hält bis heute an. Die differentialgeometrische Darstellung der *Gravitation* scheint hierbei eine Sonderstellung einzunehmen, obgleich ausgesprochen zutreffend in der Beschreibung kosmologischer Phänomene, passt diese Kontinuum-Theorie so gar nicht zu bereits bestehenden Modellwelten aus der Quantenphysik. Alle Versuche der Vereinheitlichung von Gravitation und Quantenmechanik blieben bisher erfolglos, ganz im Gegensatz zur *Quantenfeldtheorie der Elektrodynamik* (QED) oder etwa zur Physik der Elektronenhülle, die auf atomarer bzw. molekularer Ebene Umstrukturierungsprozesse der Elektronenkonfiguration beschreibt (→ Chemie).

Zudem ist festzustellen, dass die im Verlauf der letzten drei Jahrhunderte geschaffenen großen physikalischen Theorien allesamt heute noch in Anwendung sind, selbstverständlich nur im Rahmen des jeweils zulässigen Applikationsbereiches dieser Modellvorstellungen. Wissenschaftstheoretische Betrachtungen, wonach der wissenschaftliche Entwicklungsprozess „*revolutionär*“ durch sogenannte *Paradigmenwechsel* geprägt sei, treffen meines Erachtens nicht bzw. nur sehr eingeschränkt zu.⁵ Ebenso wie etwa „*darwinistische*“ Prozesse, wonach „*erklärungsstarke*“ mit „*erklärungschwachen*“ Theorien konkurrieren und letztere zwangsläufig aus unserem Weltbild verdrängen.⁶ Der Entwicklungsprozess einer physikalischen Theorie ist objektiv, d.h. wissenschaftstheoretisch nur schwer zu fassen, denn „*Wissenschaft hat viele subjektive Komponenten, schließlich wird sie von Menschen gemacht.*“⁷ Der Mensch nimmt in diesem Prozess gleich in mehrfacher Hinsicht die zentrale Rolle ein! Die Entstehung und insbesondere die Akzeptanz einer physikalischen Modellvorstellung muss deshalb immer im historisch-gesellschaftlichen Kontext gesehen werden. Ein Naturwissenschaftler kann sich als Mensch, mit all seinen Stärken und Schwächen, den psychologischen Einflüssen des jeweils vorherrschenden gesellschaftlichen Zeitgeistes kaum entziehen. Hier spielen sowohl soziale, politische als auch religiöse Aspekte eine wesentliche Rolle.⁸ Ein wichtiger sozialer Aspekt zeigt sich beispielsweise (nicht nur) heutzutage im oftmals fehlenden gegenseitigen Respekt bei wissenschaftlichen Kontroversen. Dieses Defizit an sozialer Kompetenz kann sich nachweislich kontraproduktiv auf den Entwicklungsprozess vielversprechender physikalischer Modellvorstellungen auswirken!

Stephen R. Covey hat diesen Mangel an Kommunikationsfähigkeit sehr treffend beschrieben:

„The biggest communication problem is, we do not listen to understand. We listen to reply!“⁹

Das „*profilierungsneurotische Verhaltensmuster*“ unbedingter Widerrede ist nicht nur in Coveys Zielgruppe aus Politik und Wirtschaftsmanagement recht ausgeprägt – es gab und gibt sie leider auch in der Physik. Ein Beispiel: Lord Rayleighs bemerkenswerter Rat an junge Physiker, seinerzeit publiziert in Phil. Trans. 183 (1892), auf dass ihre innovativen Arbeiten nicht durch sogenannte „*Gutachten*“ anerkannter Experten aus eben solchen Motiven unbedacht abschlägig beurteilt werden:

„Sie sollten [ihre Arbeit] nur dann einer wissenschaftlichen Gesellschaft zusenden, wenn in ihnen nicht zu viele neue Gedanken enthalten seien. Außerdem wäre es klüger, sich vorerst mit leicht beurteilbaren Ausführungen zu einem allgemein akzeptierten Thema Anerkennung zu verschaffen!“¹⁰

Man denke auch an die Entdeckung der Quasi-Kristalle durch den Physiker Dan Shechtman (1982), die lange Zeit von namhaften Wissenschaftlern (u. a. Nobelpreisträger) auf z. T. polemische Weise disqualifiziert wurde, um ein Beispiel aus heutiger Zeit zu benennen. Shechtman erhielt schließlich 2011 den Nobelpreis für seine richtungsweisende Arbeit.

Die aktuelle Forschung nach „*neuer Physik*“ beschäftigt sich u. a. in der Teilchenphysik mit alternativen Modellvorstellungen wie den „*String-Theorien*“ oder „*Parallelwelten*“, in der Quantenphysik mit „*Grand Unified Theories*“ (GUTs), also Versuche der weiteren Vereinheitlichung bereits bestehender Modelle, unter Beibehaltung der Quantenstruktur, oder in der Kosmologie mit sog. „*dunkler Energie*“ bzw. „*dunkler Materie*“, allerdings ohne nennenswerte Fortschritte in den genannten Bereichen zu erzielen! Bestenfalls finden „*althergebrachte*“ theoretische Vorhersagen nach vielen Jahrzehnten endlich ihre experimentelle (und nobelpreiswürdige) Bestätigung (→ Higgs-Boson, Gravitationswellen, etc.). Was also ist genau diese „*neue Physik*“, deren Forschungsvorhaben in erster Linie dadurch auffallen, dass sie ausgesprochen teuer sind und vergleichsweise wenig Neues zutage fördern? Die Wortschöpfung steht synonym für alles, was wir Physiker auf unserem Weg zur „*Weltformel*“ bisher glauben übersehen zu haben bzw. immer noch nicht verstanden haben mathematisch konsistent zu beschreiben. In der Physik entspricht die „*einheitliche Theorie für Alles*“ dem „*Heiligen Gral*“ aus der Artus-Sage, denn für beide Hypothesen gibt es keine tragfähigen Argumente, die eine Suche danach rechtfertigen könnte. Gegen Ende meines Studiums konnte ich mich für solche vorwiegend theoretischen Arbeiten zur Grundlagenphysik nicht so recht begeistern, obwohl mir seinerzeit die *Theoretische Physik* sehr am Herzen lag. Es waren u. a. die (mir) unverständlichen Konzepte der *Klassischen Physik*, die mich damals

davon abhielten „*neue Physik*“ mit ungleich „*exotischeren*“ Konzepten zu wagen. Man kann nicht den zweiten Schritt vor dem ersten tun und darauf hoffen, dass man nicht gänzlich ins Stolpern gerät – das schien mir zu jener Zeit wenig sinnvoll und so ist es auch heute noch, zumal sich meines Erachtens an dem Dilemma in der theoretischen Physik bis heute faktisch nichts geändert hat.

■ 1.1 Modellierungskonzepte

Modellieren heißt, sich ein Bild von einer realen Gegebenheit zu machen, sodass mittels der gewählten Darstellung alle relevanten Aspekte einer Problemstellung sich eindeutig beschreiben lassen und die damit verbundenen Fragen nach dem *Wie* beantwortet werden können. Dies kann auf ganz unterschiedliche Art und Weise geschehen, wie Bild 1.2 verdeutlichen soll.

Ausgehend von realen Beobachtungen und Erfahrungen, wie z. B. dem jahreszeitlichen Verlauf von Sonnenaufgang bzw. -untergang, den unterschiedlichen Phasen des Mondes, das periodische Verhalten von Ebbe und Flut etc., kann sogenanntes Faktenwissen geschaffen werden. Hierbei werden Daten aus Beobachtungen und Messungen tabellarisch festgehalten und kontinuierlich anhand aktueller Beobachtungen überprüft und ergänzt. Mithilfe dieser empirisch gewonnen Fakten lassen sich zuverlässige Vorhersagen treffen, ohne im Detail beschreiben zu müssen, wie diese Phänomene genau zustande kommen. Es reicht völlig aus, zu wissen, dass diese Phänomene in der dokumentierten Art und Weise immer wieder auftreten. Auf Basis dieser Kenntnisse können in der Folge mittels hypothetischer Annahmen weiterführende Modelle zum Geschehen und damit *Know-how* aufgebaut werden (→ konstruktive Theorien). Beschreibt solch ein Modell widerspruchsfrei die Beobachtungen, kann es ersatzweise zur Erstellung von Prognosen verwendet werden. Auf diese Weise ist z. B. das geozentrische Planetenmodell (→ Ptolemäische Modellvorstellung¹¹) entstanden. Im Rahmen der beschränkten Beobachtungsgenauigkeit stand dieses Modell für mehr als 1800 Jahre in Einklang mit Daten und – im Mittelalter noch wichtiger – mit den kirchlichen Dogmen zum Christentum im damaligen Europa. Erste kleinere Abweichungen in der Beobachtung der Planetenbewegungen konnten noch durch Aufstellung zusätzlicher Hypothesen (→ Epizyklen) berücksichtigt werden, um auf diese Weise das Modell zu retten, bis es schließlich um 1600 durch das heliozentrische Weltbild (→ Kopernikanisches Modell¹²) ersetzt werden musste.

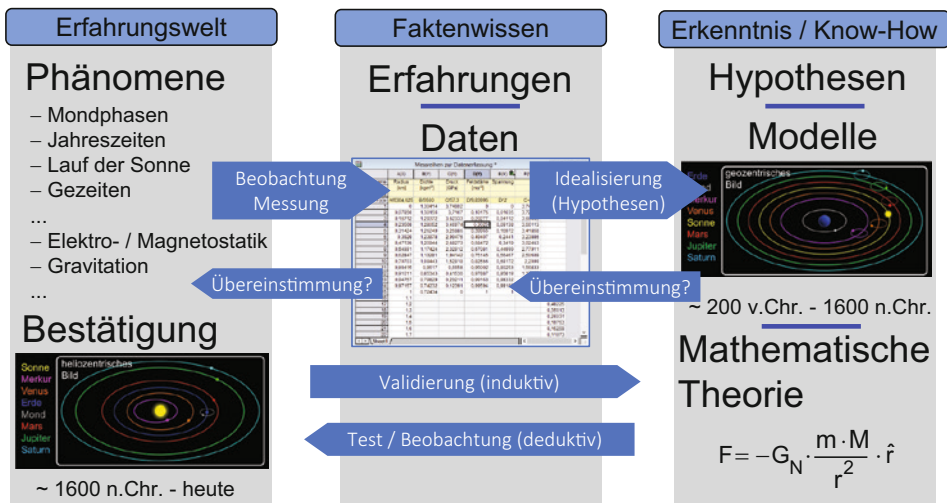


Bild 1.2 Darstellung verschiedener Modellkonzepte zur Beschreibung von Beobachtungen aus der Erfahrungswelt mittels Faktenwissen, weiterführender Hypothesen & Modelle bzw. mathematischer Theorien.¹³

In einem weitergehenden Abstraktionsschritt lassen sich Modelle oftmals über mathematische Theorien formal beschreiben. Im Falle der Planetenbewegung ergeben sich die Bahngleichungen beispielsweise direkt aus dem Newton'schen Gravitationsgesetz.¹⁴ Umfangreiche Tabellenwerke werden so durch kompakte Gleichungen ersetzt, und auch deren Gültigkeit lässt sich experimentell überprüfen.

Neben der bereits geschilderten konstruktiven Methode, um ein geeignetes Modell für spezifische Aspekte der Erfahrungswelt zu erstellen, verwendet die Physik ein weiteres „Modellierungsverfahren“, indem axiomatisch wenige, grundlegende Prinzipien postuliert werden (→ Prinzipientheorie), woraus mithilfe geeigneter mathematischer Methoden nachprüfbar physikalische Aussagen abzuleiten sind. Auch diese intuitiven Modell-Ideen sind im Allgemeinen *nicht* auf induktivem Wege aus der Erfahrungswelt ableitbar. Es gibt tatsächlich *keine* erfolgversprechende Verfahrensweise, wie man zu solchen Prinzipien gelangen kann!¹⁵ Eingebungen dieser Art „fallen einfach vom Himmel“ und können sich hin und wieder als zielführend erweisen, aber nicht selten „fällt man damit auf die Nase“. Ein guter Kandidat hierfür wäre nach meinem Dafürhalten die „String-Theorie(n)“ (→ String-Kosmologie – Quantengravitation), weil einerseits erhebliche mathematische Hürden zu überwinden sind, um auf Basis der Modellvoraussetzungen überhaupt zu empirisch verwertbaren Aussagen zu gelangen und diese andererseits dennoch kaum experimentell nachprüfbar sind!¹⁶ Ein gravierendes Dilemma, sodass String-Theoretiker bereits ernsthaft die Frage erörtern, ob die Qualität einer physikalischen Theorie zwingend an der Faktenlage empirischer Befunde geprüft werden müsse, wenn

doch die Mathematik konsistent sei, diese unerwartete (neue) Zusammenhänge zeige und es zudem an erfolgversprechenden Alternativen fehle (→ Postempirismus)?! (Hossenfelder, 2018).¹⁷

■ 1.2 Definition und Abstraktionsebenen eines Modells

Zu Beginn dieses Abschnitts bedarf es in Sachen „*Modell*“ noch einer sinnvollen begrifflichen Festlegung, also einer Antwort auf die Frage:

Was genau ist ein Modell?

In der Literatur gibt es hierfür keine eindeutige Definition, weil dieser Begriff, je nach Kontext, in unterschiedlicher Weise zu interpretieren ist. Wir wollen uns auf *physikalische Modelle* beschränken und in unserer Betrachtung nicht zu tief in die Wissenschaftstheorie einsteigen.¹⁸

Unter einem physikalischen Modell verstehen wir folgenden Sachverhalt:



„Ein physikalisches Modell ist ein idealisiertes Bild von Teilaspekten der menschlichen Erfahrungswelt (→ Realität), das stellvertretend zu naturwissenschaftlichen Verständniszwecken herangezogen werden kann.“

Modelle fokussieren also immer auf spezifische Gesichtspunkte unserer Erfahrungswelt und können folglich diese unsere Wirklichkeit bestenfalls „*realitätsnah*“ jedoch *niemals* „*realitätsgetreu*“ beschreiben!¹⁹ Aber was heißt das nun wieder genau? Besser gefragt:

Wofür stehen in diesem Zusammenhang die Begriffe „*Realität*“ bzw. „*Erfahrungswelt*“?

Beide Bezeichnungen habe ich bereits mehrfach synonym und kommentarlos verwendet und damit stillschweigend vorausgesetzt, dass der Leser intuitiv schon das „*Richtige*“ damit verbinden wird, nämlich „*die uns gemeinsame Welt da draußen*“. Aber ist *Ihre* Erfahrungswelt auch *wirklich* die meine? Die moderne Kognitionsforschung geht beispielsweise davon aus, dass das menschliche Gehirn prinzipiell keine objektive Wirklichkeit kennt, weil eine Außenwelt nur auf indirektem Wege, nämlich über unsere Sinneswahrnehmungen zugänglich ist (mittels diverser, teils komplementärer biologischer Sensoren, inklusive neuronaler Messwertübertragung und Datenauswertung). Nach A. K. Seth kann deshalb die individuell wahrgenommene Realität kein unmittelbares Abbild einer objektiven Außenwelt sein, vielmehr beruhe diese Wahrnehmung auf Prognosen, die unser Gehirn zu mög-

lichen Ursachen eintreffender Sinnessignale erstellt. Sensorisch erkannte Abweichungen zu diesen Annahmen (→ sensorische Vorhersagefehler) führen zu einer fortlaufenden Korrektur der subjektiv empfundenen Erfahrungswelt. Wahrnehmung sei also nichts anderes als eine sensorisch kontrollierte Halluzination.²⁰ Eine bemerkenswerte These und das Interessante hierbei ist, dass wir Physiker methodisch auf die exakt gleiche Weise vorgehen, wenn wir Modelle (→ Prognosen) zu bestimmten Aspekten unserer Außenwelt erstellen. Auf der Suche nach möglichen sensorischen Vorhersagefehlern zu einer gegebenen Modellvorstellung müssen wir in der Regel unsere Sinneswahrnehmung durch eine ausgeklügelte Messtechnik erweitern, die allerdings auf der gleichen oder einer ähnlichen Modellvorstellung beruht – kognitiv also kein einfaches Unterfangen, möchte man aus einer Vielzahl möglicher Erfahrungswelten (→ „*naturwissenschaftliche Halluzinationen*“) auf „*die Realität*“ als „*das unmittelbare Abbild einer objektiven Außenwelt*“ schließen. Es spricht mittlerweile einiges dafür, dass es diese eine Realität so nicht geben kann! Folgt man beispielsweise den Ausführungen der Psychologie über die Bildung von Bewusstsein, so ist Physik nichts anderes als eine mathematische Beschreibung von geschaffenen Bewusstseinsinhalten über alternative Erfahrungswelten ... – aber zurück zum eigentlichen Thema.

Je nach Verwendungszweck und Komplexität lassen sich physikalische Modelle unterschiedlichen Abstraktionsebenen zuordnen. Die einfachste Form ist das Replikat (→ physikalisches Experiment), ein auf wesentliche Aspekte abzielender experimenteller Aufbau des interessierenden Naturgeschehens, zur Untersuchung und quantitativen Erfassung bestimmter Modellgrößen. Experimentelle Aufbauten dieser Art erlauben vergleichende Tests und Optimierungen, wie in Bild 1.3 im Falle der Lichtbrechung verdeutlicht.

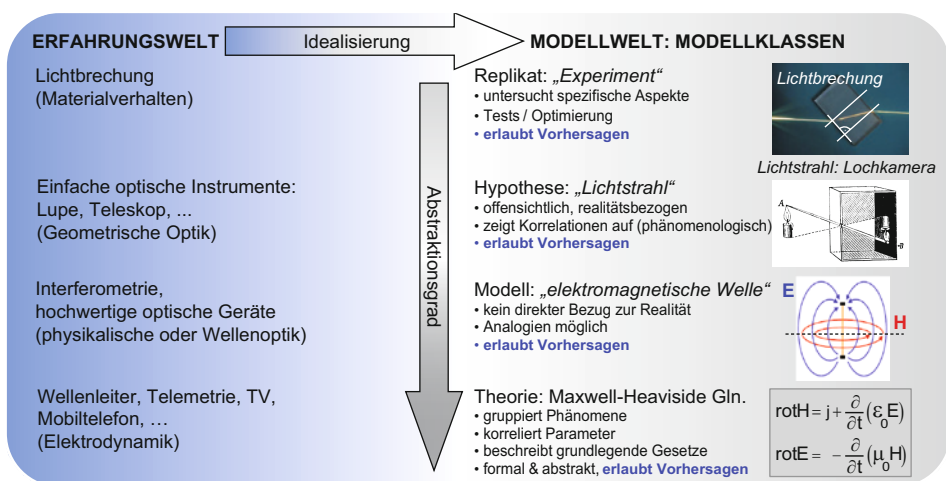


Bild 1.3 Komplexität und Abstraktionsebenen physikalischer Modelle am Beispiel des Phänomens „Licht“ (weitere Details hierzu werden in Abschnitt 1.5 diskutiert).²¹

Die erzielten experimentellen Befunde motivieren u. a. die „*Lichtstrahl*“-Hypothese der geometrischen Optik, womit das Zusammenspiel verschiedener optischer Elemente untersucht und auf theoretisch einfache Weise dargestellt werden kann, um z. B. mittels phänomenologischer Gesetzmäßigkeiten das Abbildungsverhalten eines Linsenensembles zu bestimmen.

Komplexere optische Geräte, Interferometer, Beugungsphänomene etc. werden schließlich über das Modell²² „*Elektromagnetische Welle*“ zutreffender beschrieben (→ physikalische Optik oder Wellenoptik). Dieses Modell umfasst eine ganze Reihe weiterer Hypothesen, welche unter bestimmten vereinfachenden Annahmen auf jene des „*Lichtstrahls*“ reduziert werden können. Modellen dieser Komplexität fehlt es oft an direkten, d. h. erkennbaren Bezügen in die Erfahrungswelt, sodass zu deren Beschreibung sog. *Analogien* aus bekannten Bereichen des Naturgeschehens herangezogen werden (im Falle der Wellenoptik z. B. Wasserwellen). In der physikalischen Lehre werden recht häufig *Analogien* zur Veranschaulichung abstrakter Modellvorstellungen verwendet, was durchaus problematisch ist, weil diese oftmals „*qualitativ schwach, suggestiv und selten logisch zwingend sind*“ (Hägele, 2007).

Die höchste Abstraktionsstufe der Modellierung (klassischer) elektromagnetischer Erscheinungen ist schließlich die mathematische Theorie zur Elektrodynamik, zusammenfassend beschrieben durch die sogenannten Maxwell-Heaviside-Gleichungen,²³ welche in ihrer heutigen Form erstmals von Oliver Heaviside 1884 aufgestellt wurden (Heaviside, 1891–1912). Diese formale Theorie erlaubt eine umfassende Gruppierung verschiedenster elektromagnetischer Phänomene, beispielsweise nach ihrem Zeitverhalten, beschreibt grundlegende Gesetzmäßigkeiten und korreliert die zugehörigen Parameter.

Eine weitere Steigerung der Abstraktion ergibt sich allerdings beim Übergang zur Theorie der Quanten-Elektrodynamik. Ein notwendiger Schritt, um die Phänomene auf der Ebene der Elementarteilchen konsistent zu beschreiben. Alle Modellklassen, von einfachen experimentellen Aufbauten bis hin zu komplexen Theorien, zeigen eine gemeinsame Eigenschaft: Sie erlauben sowohl qualitative als auch quantitative *Vorhersagen*! Sie beschreiben *wie* entsprechende Phänomene in der Erfahrungswelt ablaufen werden, bei Vorgabe eines bestimmten Ausgangszustandes unter wohl definierten Randbedingungen.

Weitere Beispiele physikalischer Modelle verschiedenster Abstraktionsstufen sind in Bild 1.4 aufgeführt. Mechanische Werkzeuge wie z. B. der Hebel, ein Flaschenzug, die schiefe Ebene gehören zur Gruppe der Replikate. Das Konzept der Kraft, des Massenpunktes, des Lichtstrahls etc. sind (nicht zu beweisende) Hypothesen. Deren Zusammenwirken führt zu Modellen und diese wiederum zu umfassenden Theorien, wie jene der *Klassischen Mechanik* oder der *Klassischen Elektrodynamik*.

ORIGINAL aus der ERFAHRUNGSWELT

Maschinen, ...

Bauwerke: Häuser, Brücken, ...

Bewegung (Fußball, Rad, Auto, ...)

Planetenbewegung ...

Wärme (thermische Ausdehnung, ...)

Hochfrequenz-Elektrizität (Leiter, Antennen, ...)

Einfache optische Instrumente, ...

MODELLE verschiedener Abstraktionsstufen

Replikate – einfache Werkzeuge, ...

Hypothese – Kraft, Drehmoment, ...

Modell – Statik¹Modell – Kinematik: $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}}(t)$, Schwerpunkt, ...Erfahrung – empirische Gesetze (→ Beobachtung)²Modell – Kinetik → $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ (Gravitationsgesetz)³Theorie – Theorie der Gravitation⁴Hypothese – Temperatur (makroskopisch)⁵Hypothese – kinetische Energie (atomare Skala)⁶Theorie – Theorie der Elektrodynamik⁷Hypothese – Geometrische Optik (Lichtstrahl)⁸

¹Pierre Varignon 1654-1722, ²Johannes Kepler 1571-1630, ³Isaac Newton 1642-1727, ⁴Albert Einstein 1879-1955, ⁵Anders Celsius 1701-1744, ⁶Ludwig Boltzmann 1844-1906, ⁷James Clerk Maxwell 1831-1879, ⁸Willebrord van Roijen Snell (Snellius) 1591-1626

Bild 1.4 Einige Beispiele physikalischer Modelle verschiedener Abstraktionsebenen und deren Erfinder.

Wie bereits im Vorwort angesprochen, kann das Experiment selbst ein eigenes Modell der Erfahrungswelt sein. Wie verhält es sich dann mit den darauf aufbauenden theoretischen Überlegungen? Stehen diese theoretischen Modelle noch in einer direkten Beziehung zu Aspekten aus der Erfahrungswelt oder repräsentieren sie ausschließlich das Modell-Experiment, wie in Bild 1.5 auf schematische Weise dargestellt? Diese Frage zum Realitätsbezug idealer Modelle wird in der Wissenschaftstheorie ausgesprochen kontrovers diskutiert. Insbesondere weist man zu Recht darauf hin, dass sich theoretische Aussagen zu Gesetzmäßigkeiten *immer* auf idealisierte Modellvorstellungen beziehen, die aber definitionsgemäß nur Teilaspekte der Erfahrungswelt abbilden können. Wenn wir zudem davon ausgehen müssen, dass es *die eine Erfahrungswelt* nicht geben kann, wie „*real*“ sind auf diese Weise gefundene „*Modell-Gesetze*“ eigentlich noch?

Nancy Cartwright vergleicht in diesem Zusammenhang phänomenologische (→ empirische) Gesetzmäßigkeiten, wie sie vorwiegend in der experimentellen Physik formuliert werden, mit den grundlegenden Aussagen aus der theoretischen Physik:

„In modern physics [...] phenomenological laws are meant to describe, and they often succeed reasonably well. But fundamental equations are meant to explain, and paradoxically enough the cost of explanatory power is descriptive adequacy. Really powerful explanatory laws of the sort found in theoretical physics do not state the truth. [...] In fact the way they are used in explanation argues for their falsehood. We explain by ‘ceteris paribus’ laws [lat.: unter sonst gleichen Umständen], by composition of causes, and by approximations that improve on what fundamental laws dictate. In all of these cases the fundamental laws patently do not get the facts right.

*The appearance of truth comes from a bad model of explanation, a model that ties laws directly to reality. As an alternative to the conventional picture I propose a 'simulacrum' account of explanation [lat.: Vergleich oder Ähnlichkeitsbetrachtung]. The route from theory to reality is from theory to model, and then from model to phenomenological law. The phenomenological laws are indeed true of the objects in reality – or might be; but the fundamental laws are true only of objects in the model.*²⁴

Das hier geschilderte Problem beschreibt sehr genau den bereits zuvor dargelegten Übergang zwischen den Abstraktionsebenen „Hypothese“ → „Modell“ → „Theorie“ am Fallbeispiel „elektromagnetische Erscheinungen“ und dem zwangsläufig damit verknüpften Verlust des direkten Bezuges zur Erfahrungswelt.

Wir Physiker versuchen, diesen Bezug in der Tat wieder dadurch herzustellen, indem wir oftmals weitere Hilfhypothesen (vereinfachende Annahmen) hinzufügen (müssen) und zusätzliche mathematische Näherungen vornehmen (müssen), auf dass die Theorie halbwegs verwertbare Resultate liefert. Diese Ergebnisse dienen uns sodann im Umkehrschluss dazu, die „Erklärungsstärke“ der Theorie zu untermauern, ohne auf mögliche Besonderheiten (etwa die allgemeine Gültigkeit) zu Hilfhypothesen bzw. Näherungen weiter einzugehen.

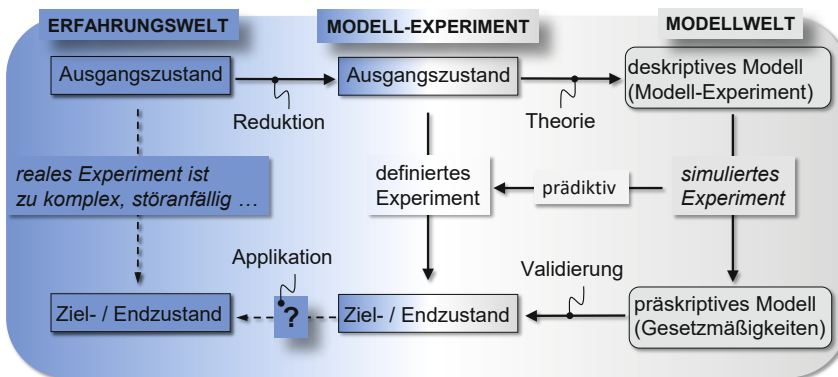


Bild 1.5 Schematische Darstellung zur Frage des Realitätsbezugs idealer physikalischer Modelle und deren Gesetzmäßigkeiten.

Es ist genau diese Verfahrensweise, die Nancy Cartwright fragen lässt:

„What has explanatory power to do with truth?“²⁵

(M)eine dezidierte Antwort auf diese Frage lautet: „Nichts!“ Eine starke physikalische Theorie bedarf idealerweise keiner Zusatzannahmen und Näherungen, um Phänomene der Erfahrungswelt umfassend zu beschreiben. Die Frage, ob sich dadurch ein wie auch immer zu definierender „Wahrheitsgehalt“ der Theorie verbessert hat oder nicht, sollte (uns) nicht interessieren, weil für die Lösung konkreter

Problemstellungen aus Physik und Technik nicht relevant, sofern wir Modelle ausschließlich als adäquate Werkzeuge für eine konsistente Beschreibung unserer Erfahrungswelt ansehen. In diesem Falle gehören wir wissenschaftstheoretisch zur Gruppe der sogenannten „*Instrumentalisten*“. Die „*Realisten*“ hingegen hinterfragen den Wahrheitsgehalt bzw. die Realitätsnähe einer Modellvorstellung, d.h. sie interessieren sich für die dem Modell zugrunde liegende *Ontologie*.

Nachdem aber Modelle immer nur spezifische Gesichtspunkte der Erfahrungswelt beschreiben, sind sie also bestenfalls Puzzlebausteine unserer Wahrnehmung, die sich nicht zwangsläufig als zueinander passende Bestandteile eines größeren Ganzen erweisen müssen. Die Ontologie zu jedem Modellkonzept zu hinterfragen, gleicht dem Versuch des Realisten die passende Verwendung einzelner Bausteine eines komplexen Puzzles anhand des darauf abgebildeten Motivausschnittes entscheiden zu wollen, ohne das eigentliche Motiv überhaupt zu kennen! Der Instrumentalist hingegen prüft ganz pragmatisch, ob seine Puzzlebausteine sich strukturell zu etwas Neuem zusammenfügen lassen. Ist dies der Fall, geht er sogleich der spannenden Frage nach, was man wohl so alles mit diesem neuen Werkzeug anfangen kann.

Eine gute Theorie zeichne sich einzig durch zwei Kriterien aus (Albert Einstein):

„1. Die Theorie darf Erfahrungstatsachen nicht widersprechen.“

„2. Die logische Einfachheit der zugehörigen Prämissen, d. h. der Grundbegriffe und der zugrunde gelegten Beziehungen zwischen diesen.“²⁶

und sie sei umso beeindruckender

„[...] je verschiedenartigere Dinge sie verknüpft und je weiter ihr Anwendungsreich ist.“²⁷

Aspekte, die beispielhaft auf die klassische Thermodynamik zuträfen, die im Rahmen der allgemeinen Anwendbarkeit ihrer Grundbegriffe wohl niemals umgestoßen werde, so Einstein.²⁸

Eine wie auch immer zu definierende „*Wahrheit*“ ist demnach kein entscheidendes Merkmal für eine gute Theorie, zumal die Physik keine fachliche Definition dieses Begriffes kennt. Weshalb eigentlich nicht? Nun, weil das auf Erfahrung beruhende sogenannte Faktenwissen (→ Nancy Cartwrights „*empirische Gesetzmäßigkeiten*“) letztlich von endlichen Datenmengen gestützt wird und diese Daten lassen sich *grundsätzlich immer* durch *verschiedene* Modellansätze beschreiben. Naturwissenschaftliche Theorien sind deshalb *stets* empirisch unterbestimmt! Demzufolge kann eine Theorie prinzipiell weder „*wahr*“ noch „*falsch*“ sein und aus dem gleichen Grund kann sie ebenso wenig als „*endgültig*“ bezeichnet werden (Hägele, 2014).

Eine Feststellung, die letztlich auf die beachtenswerten Überlegungen von Karl Popper²⁹ zurückgeht, der sich eingehend mit den philosophischen Aspekten zum naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess auseinandersetzte und u. a. folgerte:

„I think that we shall have to get accustomed to the idea that we must not look upon science as a ‘body of knowledge’, but rather as a system of hypotheses; that is to say, as a system of guesses or anticipations which in principle cannot be justified, but with which we work as long as they stand up to tests, and of which we are never justified in saying that we know that they are ‘true’ or ‘more or less certain’ or even ‘probable’.“³⁰

Popper vertrat die Auffassung, dass sich auf empirisch induktivem Wege keine allgemeingültigen Naturgesetze folgern lassen, denn man kann schließlich *„nicht mehr wissen, als man weiß“*, d. h. entsprechende Modelle bleiben in der Tat stets empirisch unterbestimmt und damit hypothetisch (→ Induktionsproblem). Entsprechende *„Theorien sind nicht verifizierbar, aber sie können sich bewähren.“³¹*

Im Übrigen sollte in der Physik der Bezug auf sogenannte *„Erfahrungstatsachen“* grundsätzlich immer einer kritischen Bewertung unterzogen werden, insbesondere dann, wenn auf diese in Verbindung mit Attributen wie *„plausibel“*, *„alltäglich“*, *„offensichtlich“*, etc. eingegangen wird. Solche *„Erfahrungstatsachen“* stehen selten für einen objektiven experimentellen Befund, stattdessen hat man es oftmals mit subjektiven modellspezifischen Wertungen physikalischer Phänomene zu tun. Modellbasierte *„Erkenntnisgewinne“* über unsere Erfahrungswelt sind deshalb stets mit Bedacht zu bewerten. Nach Einsteins Überzeugung müsse man sogar viel mehr behaupten:

„Die in unserem Denken und in unseren sprachlichen Äußerungen auftretenden Begriffe sind alle – logisch betrachtet – freie Schöpfungen des Denkens und können nicht aus den Sinnen-Erlebnissen induktiv gewonnen werden. Dies ist nur deshalb nicht so leicht zu bemerken, weil wir gewisse Begriffe und Begriffsverknüpfungen (Aussagen) gewohnheitsmäßig so fest mit gewissen Sinnerlebnissen verbinden, dass wir uns der Kluft nicht bewußt werden, die logisch unüberbrückbar die Welt der sinnlichen Erlebnisse von der Welt der Begriffe und Aussagen trennt.“³²

Folgt man der Auffassung von Henning Genz, so haben wir dennoch keinen Grund zu der Annahme, dass die im Rahmen der physikalischen Modellbildung gefundenen Naturgesetze rein menschliche Erfindungen sind. Was sie jedoch genau sind, wissen wir (noch) nicht.³³

■ 1.3 Modelleigenschaften und Modellierungsziele

Nach Herbert Stachowiak (Stachowiak, 1973) zeichnen sich naturwissenschaftliche Modelle durch drei Applikationseigenschaften aus:

- **die Projektion:** Ein Modell ist immer ein vereinfachtes Abbild des Originals.
- **die Reduktion:** Die dem Original zugeordnete Vielfalt an Attributen wird auf einen modellspezifischen, d.h. relevanten Parametersatz reduziert, zwecks besserer Handhabbarkeit.
- **die Substitution:** Das Original wird einzig für die gegebene Problemstellung und unter wohl definierten Bedingungen durch das Modell ersetzt.

Bild 1.6 soll diesen Sachverhalt am Beispiel eines fiktiven Fallexperiments verdeutlichen, welches wir der Legende nach von Galileo Galilei in Pisa durchführen lassen, auf dass er mehr über die Physik des freien Falls in Erfahrung bringen möge, insbesondere wie Fallzeit und die zugehörige Fallgeschwindigkeit unterschiedlicher Objekte zusammenhängen.³⁴

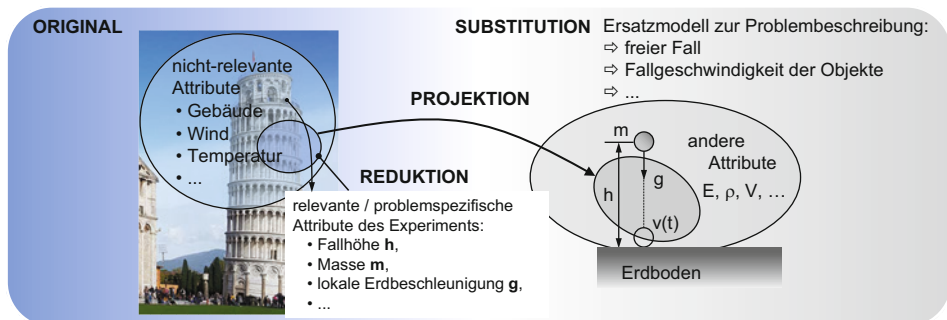


Bild 1.6 Applikationseigenschaften eines Modells, nach (Stachowiak, 1973), veranschaulicht am Beispiel eines fiktiven Fallexperiments, das der Erzählung nach von Galileo Galilei durchgeführt wurde.³⁵

Die experimentellen Rahmenbedingungen (Original) werden durch eine Vielzahl von Eigenschaften (Attribute) beschrieben, wie z.B. die Wetterverhältnisse (Wind, Temperatur, etc.), die Gebäudeabmessungen, spezifische Eigenschaften der Testobjekte (Geometrie, Dichte, Masse). Galilei vermutet aber bereits, dass nur wenige davon wirklich relevant sind und ersetzt zu diesem Zweck das Original durch ein einfaches mathematisches Modell, welches die Fallgeschwindigkeit $v(t)$ und die Fallzeit t in eine lineare Relation zueinander setzt, und er findet in der Tat für eine

Vielzahl seiner Testobjekte, nämlich jene deren Luftwiderstand im Experiment vernachlässigt werden kann, folgende einfache Beziehung experimentell bestätigt:

$$v = a_{\text{Pisa}} \cdot t \Rightarrow h = \frac{a_{\text{Pisa}}}{2} \cdot t^2 \quad \text{Gl. 1.1}$$

Demzufolge fallen alle Gegenstände gleich schnell zu Boden, unabhängig von ihrer Masse und ihrer genauen Beschaffenheit. Wird die Fallhöhe h in der Einheit *Meter* und die Fallzeit t in der Einheit *Sekunde* gemessen, so ergibt sich für die (in Pisa) gefundene Fallkonstante a_{Pisa} :

$$a_{\text{Pisa}} = 9,8 \text{ ms}^{-2} \quad \text{Gl. 1.2}$$

(Gl. 1.1) ersetzt in kompakter Weise ganze Datensätze früherer Messungen und erspart zukünftig ähnliche Untersuchungen, sofern diese nicht zur Prüfung der allgemeinen Gültigkeit der zu jener Zeit in Pisa gefundenen Beziehung durchgeführt werden.



A₁₋₁: Aus Galileis überlieferten Messprotokollen zur schiefen Ebene erhält man einen deutlich kleineren Wert, nämlich $a_{\text{Florenz}} \cong 5 \text{ m/s}^2$, wieso unterscheiden sich wohl die Werte aus Florenz und Pisa?

Modelle lassen sich demnach wie folgt charakterisieren (Stachowiak, 1973):

Sie sind

- **formal**, d.h. reale Phänomene werden oftmals über mathematische Beziehungen beschrieben.
- **deskriptiv**, d.h. sie ersetzen und beschreiben unter bestimmten Voraussetzungen Teilaspekte des Originals.
- **explorativ**, d.h. sie erlauben die Untersuchung unmittelbarer Folgen im Falle variierender Eingangsgrößen (prädiktiv) und ermöglichen auf diese Weise Vorhersagen über zukünftiges Geschehen (präskriptiv).

Möchte man beispielsweise im Rahmen einer Problembeschreibung oder einer Optimierungsaufgabe die Veränderungen eines gegebenen Ausgangszustandes bestimmen, so kann dies in der realen Welt bereits an den Rahmenbedingungen scheitern (vgl. Bild 1.7). Der Ausgangszustand existiert z.B. noch nicht oder entzieht sich der direkten Beobachtung, er ist evtl. zu komplex in der Handhabung und/oder schwierig zu kontrollieren, weil störanfällig. Die geplanten Veränderungen sind möglicherweise gefährlich und ausgesprochen kostenintensiv oder aber prinzipiell nicht durchführbar. Zusätzlich können die zu untersuchenden Prozesse in der Realität auf Zeitskalen ablaufen, die experimentell nicht oder nur unter großem Aufwand zugänglich sind.

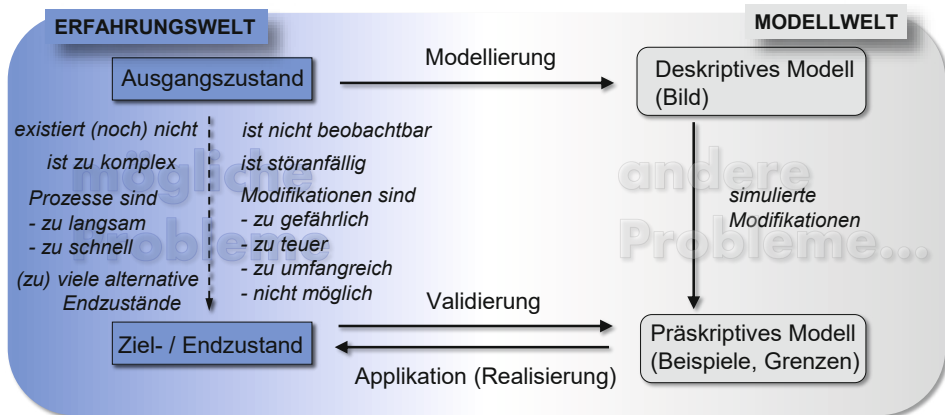


Bild 1.7 Zur Definition und Motivation von Modellierung und Simulation, nach (Stachowiak, 1973).

Im Verlauf der Projektplanung kann sich zudem zeigen, dass deutlich umfangreichere Optimierungsschritte erforderlich sind, deren konstruktives Zusammenwirken aber nur schwer abgeschätzt werden kann. Im ungünstigsten Fall bleibt es gänzlich unklar, welche Art von Modifikation letztlich zielführend sein wird, so dass man auf experimentellem Wege eine Systematik zu erkennen hofft (→ DOE – Design of Experiment³⁶) oder das Gegenteil kann der Fall sein: Es gibt zu viele gute Alternativen zur Auswahl und man hat hieraus die optimale Lösung zu bestimmen.



A₁₋₂: Welche Beispiele aus Forschung und Technik fallen Ihnen spontan zu den genannten Problemstellungen ein, die das Erreichen eines gewünschten Entwicklungsziels zumindest erschweren kann?

In all diesen Fällen macht man sich die deskriptiven Modelleigenschaften zunutze und führt die geplanten Veränderungen in der Modellwelt durch, d. h. man *simuliert* die Auswirkungen möglicher Modifikationen und erhält ein präskriptives Modell des Zielzustandes. Je nach Resultat und (Vertrauen in die) Zuverlässigkeit des entsprechenden Modellansatzes wird der gewünschte Zielzustand realisiert, und das Ergebnis kann in der Folge zur Validierung bzw. zur weiteren Verbesserung des Modells herangezogen werden. Mithilfe der Simulation lassen sich sehr wohl zahlreiche entwicklungstechnische Hürden erfolgreich umgehen, wenn man dieses Werkzeug richtig einzusetzen weiß. Auch deshalb ist die einer Simulation zugrunde liegende Modellierung nicht zwangsläufig der ultimative Schlüssel zum Erfolg. Im Gegenteil, für den Anwender stellen sich in diesem Zusammenhang oftmals *andere und gänzlich neue Problemfelder* ein, wie sie exemplarisch in den beiden folgenden Abschnitten beschrieben werden sollen.

■ 1.4 Ein Modellierungsleitfaden

„Models based on good theory can compensate for lack of data, and models based on broad evidence can compensate for lack of theory, but models alone can hardly compensate for the lack of both!“

M. L. Loper³⁷

Modellieren ist in gewisser Weise eine Kunst³⁸ und bedarf entsprechender Erfahrung (und etwas Talent), um zu einem gegebenen Problem die „richtigen“ Modellansätze zu finden. Es ist nicht immer unmittelbar ersichtlich, welche Form der Abbildung zielführend ist und welche Parameter hierfür relevant und welche vernachlässigt werden können. Ist das Modell zu komplex gewählt, weil man einfach nichts vernachlässigen möchte, sind unter Umständen Lösungen schwer zu finden, etwa aufgrund sich einstellender numerischer Probleme, oder sie sind gar unmöglich. Ist hingegen das Modell zu einfach aufgebaut, zielt es womöglich an der eigentlichen Problemstellung vorbei. In diesem Zusammenhang erscheint die sogenannte „exakte Naturwissenschaft“ Physik in der Wahl des Modellansatzes doch recht beliebig, mitunter zufällig und darüber hinaus auch anfällig für „Trends“. Nicht von ungefähr heißt es diesbezüglich, dass jede große physikalische Theorie als Ketzerei beginne und schließlich als Vorurteil ende. Mit anderen Worten, die Physik entwickelt zuweilen eine starke Präferenz für bestimmte Modellvorstellungen und lässt konsequent alternative Ansätze außer Acht. Wieso? Nun, zum einen entsprechen diese nicht dem vorherrschenden Zeitgeist, weshalb die hierfür erforderliche finanzielle Unterstützung in der Regel nicht zur Verfügung steht und zum anderen unterbindet der (in heutiger Zeit) zunehmende Publikationsdruck in der akademischen Forschung fast zwangsläufig alternative Entwicklungsansätze. Das Forschungsprojekt *muss* (!) schließlich publikationswürdige Resultate liefern, also wird man in eine Richtung arbeiten wollen, die zumindest gewisse Erfolgsaussichten auf „berichtenswerte“ Ergebnisse versprechen (→ publication bias). Auf diese Weise werden der eigene wissenschaftliche Werdegang *und* die finanzielle Förderung ähnlich gelagerter akademischer Projekte auch zukünftig sichergestellt (→ mainstream science) – also eine klassische *Win-win*-Situation. Allerdings ist nach meiner Ansicht eine freie, d. h. ergebnisoffene Forschung unter solchen Randbedingungen kaum noch möglich.³⁹

Darüber hinaus entfalten Physiker zuweilen auch ästhetische Vorlieben bei der Ausarbeitung eines Modells, indem sie ausschließlich „elegante Modelle“ favorisieren. „Schöne Formeln“ werden eher befürwortet, d. h. als „zielführend“ oder als „wahr“ empfunden als weniger elegante mathematische Ansätze.⁴⁰ Dieses ausgesprochen subjektive Auswahlkriterium kann (fast zwangsläufig) zu gravierenden Fehleinschätzungen hinsichtlich der Qualität einer Modellvorstellung führen, denn „Ästhetik ist kein wissenschaftliches Kriterium!“ (Hossenfelder, 2018), um den ohne-

hin sehr vagen Begriff der „*Realitätsnähe*“ eines Modells zu beschreiben. Menschen (und somit auch wir Physiker) neigen evolutionsbedingt dazu, überall nach „*schönen*“ Strukturen, Mustern und Symmetrien Ausschau zu halten, und wo auch immer man glaubt, diese entdeckt zu haben, vermutet man sogleich bedeutungsvolle Ursachen, die eine Zufälligkeit des Geschehens unbedingt ausschließen. Ein Aberglaube, der bereits so manche Forschung auf den „*naturwissenschaftlichen Holzweg*“ führte und in der Folge „*besonders dicke Bretter zu bohren waren*“, um den erforderlichen „*Paradigmenwechsel*“ herbeizuführen.

Auch deshalb darf man „[...] von der Physik nicht erwarten, dass sie einer algorithmisch arbeitenden Maschine gleicht, die nach festen Regeln immer neue Wahrheiten produziert. So etwas kann es in einer erkenntnisorientierten Wissenschaft [prinzipiell] nicht geben.“⁴¹ Der in Bild 1.8 dargestellte Leitfaden aus den Ingenieurwissenschaften gibt eine Hilfestellung, die den Aufbau eines für die jeweils vorliegende Problemstellung geeigneten Modells erleichtern soll (Loper, 2004).

Wird die in der Leitlinie aufgeführte WWW-Hürde gemeistert, d.h. die entscheidenden W-Fragen „Was ...“, „Wozu ...“ und „Wovon ...“ beantwortet, steht einer erfolgreichen Modellbildung prinzipiell nichts mehr im Wege. Nicht selten aber scheitert man im ersten Anlauf bereits an der Formulierung des Problems! Ist diese Klippe genommen, zeigt oftmals die Aufgabe das Modell zu spezifizieren, wie wenig man tatsächlich über die vorliegende Problemstellung weiß, um eine adäquate Beschreibung des Modellansatzes zu liefern.

1. Formuliere das Problem:

- Was möchte man wissen?
- Wozu benötigt man diese Information(en)?

2. Beschreibe das Modell:

- Ein Modell Wovon, welche Effekte sollen vernachlässigt bzw. nicht in Betracht gezogen werden?
- Festlegung der unabhängigen Parameter, d.h. die Einflussgrößen des Modells, deren Verhalten nicht notwendig durch den gewählten Ansatz studiert werden können.
- Festlegung der abhängigen Parameter, d.h. alle Größen, deren Verhalten das Modell beschreiben soll.
- Spezifikation der Wechselbeziehungen aller Parameter.

3. Nutzen des Modells:

- Sind Daten zu den Eingabegrößen verfügbar und im Modell auch verwendbar, um entsprechende Vorhersagen zu treffen?

4. Validierung des Modells:

- Verwende das Modell für Vorhersagen, welche direkt experimentell oder theoretisch überprüft werden können.

Bild 1.8 Ein Leitfaden zum Aufbau eines physikalischen Modells, nach (Loper, 2004).

Bewertet man nach dieser Methode rezentere Forschungsarbeiten aus der theoretischen Physik, ergeben sich ernüchternde Befunde. Beispielsweise wären „*String-Theorien*“ völlig nutzlos, weil sie im Rahmen der Quantengravitation Punkt 3 und 4 nicht erfüllen (können). Kosmologische Modelle zum Thema „*Dunkle Materie/*

Energie“ scheitern bereits bei Punkt 2, und den Arbeiten zur Quantentheorie fehlt die Problembeschreibung (Punkt 1; es gibt nämlich kein Problem mit diesem Modell, es beschreibt auf hervorragende Weise unseren Mikrokosmos). In Sachen Kosten-Nutzen (engl. ROI – Return On Invest) sind diese Initiativen im Grunde nicht zu rechtfertigen. Man mag einwenden, dass der ROI in der Grundlagenphysik sich in erster Linie durch *Erkenntnisgewinn*, also ein mehr an *Know-how* darstellt und sich weniger über wirtschaftliche Aspekte definiert. Das ist selbstverständlich korrekt, aber sicher nicht um jeden Preis und insbesondere nicht auf Kosten des wissenschaftlichen Nachwuchses, weshalb beim Aufbau entsprechender Modelle die Vorgaben des Leitfadens unbedingt befolgt werden sollten. Auf diese Weise wird das erforderliche „*intellektuelle Kapital*“ perspektivisch sinnvoll(er) eingesetzt, d.h. insbesondere junge und hoch motivierte Wissenschaftler erhalten eine nachhaltige(re) Ausbildungs- und Arbeitsperspektive, sei es im industriellen oder auch im akademischen Umfeld und sind nicht gezwungen auf Dauer „*befristete akademische Beschäftigungstherapien*“ nachgehen zu müssen, zumal sie auch noch nebenbei ihren (evtl. familiären) Lebensunterhalt zu bestreiten haben.⁴²

Die Erstellung eines Modells sollte stets schrittweise erfolgen, wobei der Modellierungsprozess einen *V-Zyklus* durchläuft, ähnlich jenem, wie er sich im industriellen Umfeld bei der Entwicklung und Validierung neuer Produkte bewährt hat (vgl. Bild 1.9). Beides, die industrielle Produktentwicklung und die Entwicklung neuer Modellvorstellungen in der Physik sind innovative Prozesse mit vergleichbaren Handlungsabläufen.

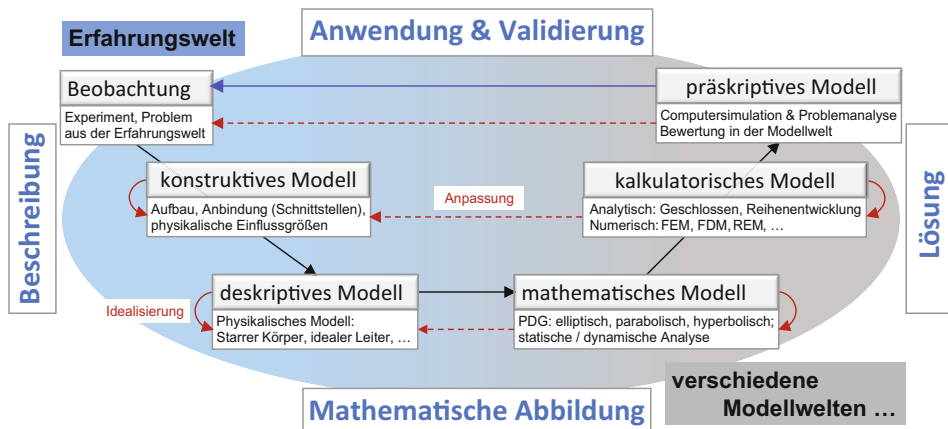


Bild 1.9 Der V-Zyklus zur Erstellung physikalischer Modelle. Jede Modellierungsphase (schwarze Pfeile), sowohl bei der Beschreibung und der mathematischen Abbildung als auch bei der späteren Lösung, erhöht im Allgemeinen den Abstraktionsgrad des Modells und erfordert in der Regel zusätzliche, die Problemstellung vereinfachende Annahmen oder Anpassungen (rote Pfeile).

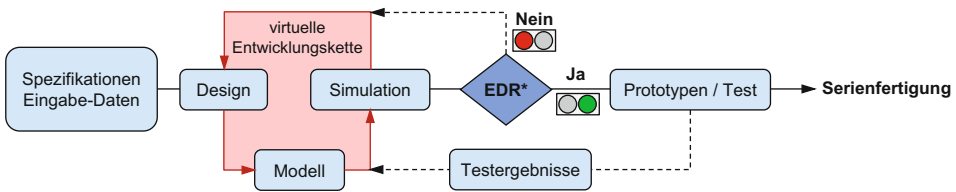
Die Funktion des in der Industrie etablierten Prozesses der *Qualitätssicherung* übernimmt bei der Erstellung eines physikalischen Modells die *Mathematik*. Die Verwendung mathematischer Strukturen stellt sicher, dass neue Modelle auf Konsistenz geprüft und auf diese Weise mögliche logische Fehler vermieden werden. Ausgehend von der experimentellen Problemstellung aus der Erfahrungswelt, erstellt man in einem ersten Schritt ein *konstruktives Modell*, indem man die geometrischen Gegebenheiten definiert, wie z.B. räumliche Strukturen bzw. eventuell vorliegende Substrukturen und bestimmt die zugehörige physikalische Anbindung an die Umgebung sowie die damit verknüpften Randbedingungen ($\rightarrow$ mechanische, elektrische, thermische Einflüsse, etc.). In der Folge erhält man hieraus ein erstes physikalisches Bild ($\rightarrow$ *deskriptives Modell*) des Problems, wofür man den zuvor identifizierten Strukturen noch die erforderlichen physikalischen (Material-)Eigenschaften zuordnen muss. Diese Eigenschaften sind so zu wählen (d.h. unter Umständen auch zu vereinfachen), dass die zugehörigen mathematischen Gleichungen Lösungsansätze bieten. Dieser abschließende Schritt der Problembeschreibung ist deshalb eng verknüpft mit der für die Problemlösung notwendigen Aufstellung eines geeigneten *mathematischen Modells*. Hierbei handelt es sich i. Allg. um einen Satz zeitabhängiger partieller Differentialgleichungen (PDG – **P**artielle **D**ifferential-**G**leichung). Das *rechnerische* oder *kalkulatorische Modell* definiert in der Folge spezifische mathematische Lösungsverfahren und kann je nach Problemstellung ganz unterschiedlich ausfallen. In seltenen Fällen lässt sich das mathematische Modell analytisch lösen, sodass explizite oder implizite numerische Berechnungsverfahren anzuwenden sind (typische Methoden sind z. B. FEM – **F**inite **E**lemente **M**ethode, FDM – **F**inite **D**ifferenzen **M**ethode, REM – **R**and-**E**lement **M**ethode, etc.).⁴³ Das Konvergenzverhalten solcher Verfahren kann empfindlich vom geometrischen Aufbau, insbesondere von der hierfür gewählten Diskretisierung und den Randbedingungen des Problems abhängen, sodass evtl. weitere Anpassungen bei der Problembeschreibung erforderlich werden, speziell im *konstruktiven Modell*, um verwertbare Ergebnisse zu erzielen. Mithilfe des Berechnungsmodells werden in der Folge Simulationen (parametrische Studien) zur Problemanalyse durchgeführt ($\rightarrow$ *prädiktive Analyse*). Die erhaltenen Datensätze ($\rightarrow$ *präskriptives Modell*) erlauben schließlich eine Bewertung künftigen Geschehens und eröffnen auf diese Weise Lösungsmöglichkeiten für die Problemstellung. Jedem der fünf geschilderten Modellierungsschritte liegen im Allgemeinen spezifische, idealisierende und die Problemstellung vereinfachende Annahmen zugrunde, sodass von Modellebene zu Modellebene der Grad an Abstraktion anwächst und man sich damit zunehmend von der (komplexen) Erfahrungswelt entfernt. Gemäß Bild 1.9 sind nämlich die erzielten Simulationsergebnisse E_{sim} das Resultat einer *sukzessiven Verkettung* der beschriebenen Modellüberlegungen M_x mit den zugehörigen Randbedingungen R_x , d.h. formal

$$E_{\text{sim}} = M_{\text{prä}}(M_{\text{kalk}}(M_{\text{math}}(M_{\text{desk}}(M_{\text{kon}}(\text{Beobachtung}; R_{\text{kon}}); R_{\text{desk}}); R_{\text{math}}); R_{\text{kalk}})R_{\text{prä}})$$

Grundvoraussetzung für eine valide Interpretation der erzielten Simulationsergebnisse ist es, den Gesamtüberblick über die dargestellte Prozesskette zu wahren, ausgehend von der Beschreibung über die mathematische Abbildung bis hin zur Lösung des Problems. Ansonsten läuft man Gefahr, mit der Simulation am Ende nur „*hübsche bunte Bildchen*“ ohne jede Aussagekraft produziert zu haben! Insbesondere wird deutlich, dass die Simulation *kein(!)* sogenanntes „*smartes*“, weil rechnergestütztes Experiment darstellen kann. Der bereits während meiner Studienzeit aufkommende und in heutiger Zeit in der naturwissenschaftlichen Lehre häufig anzutreffende Begriff „*Computerexperimente*“ ist in diesem Zusammenhang irreführend. Solche „*Experimente*“ sind definitiv kein effizienter (kostengünstiger) Ersatz für eventuell fehlende Laborausstattung. Physikalische Experimente laufen stets in der Erfahrungswelt ab (linker Ast des V-Zyklus in Bild 1.9), selbst wenn sie vereinfachende Modellannahmen repräsentieren sollten (→ Modell-Experiment: Replikate). Die Computersimulation ist hingegen das Ergebnis weiterer z. T. komplexer Mathematisierungs- und Implementierungsschritte auf dem Rechner (rechter Ast des V-Zyklus), wobei zusätzliche „*numerische Freiheitsgrade*“ auch nicht-physikalische „*(Computer-)Experimente*“ ermöglichen, d. h. dem Anwender erweiterte Parameterstudien erlauben, die auf reproduzierbare Art und Weise scheinbar plausible Resultate liefern können und einen u. U. dennoch auf den „*naturwissenschaftlichen Holzweg*“ führen, weil nämlich das zugehörige Pendant aus der Erfahrungswelt fehlt! Aus diesem Grunde ist die Vermittlung handfester experimenteller Fertigkeiten im Verlauf eines wissenschaftlichen Studiums *alternativlos*, auch wenn der Lehralltag an so mancher Universität mittlerweile einen anderen Weg geht, an dessen Ende „*Studenten beigebracht wurde, sich allzu sehr auf Computermodelle zu verlassen, sodass ihr Defizit an praktischer Erfahrung sich als äußerst nachteilig erweisen kann*“ (M. L. Loper), etwa bei künftigen Anwendungsprojekten im akademischen oder industriellen Umfeld, letztlich in Ermangelung einer soliden beruflichen Qualifikation der Absolventen.

■ 1.5 Potential, Grenzen und Risiken der Modellierung

Modellieren generiert Know-how. Dieser Erkenntnisgewinn lässt sich auf vielfache Weise sinnvoll nutzen, beispielsweise in der simulationsgestützten Forschung und Entwicklung, wie bereits in Abschnitt 1.3 geschildert. Modelle ermöglichen eine systematische Analyse komplexer Systeme, indem alle hierfür relevanten Daten in der Regel unmittelbar zur Verfügung stehen (→ „*virtual data acquisition*“) und verbessern damit die Effizienz technischer Entwicklungsprozesse (→ „*virtual engineering*“), wie beispielhaft in Bild 1.10 skizziert.



* Engineering Design Review: Abteilungsübergreifende Bewertung zum Stand der Produktentwicklung

Bild 1.10 Beispiel einer simulationsgestützten Produktentwicklung. Spezifikationen zu Design- und Fertigungsfragen sind vorab im Modell berücksichtigt und müssen nicht oder nur noch stichprobenartig am späteren Produkt geprüft werden. Testergebnisse dienen der Modellvalidierung und -optimierung.

Modelle ersetzen reale zeit- und kostenintensive experimentelle Studien, unterstützen auf diese Weise Entscheidungsprozesse, tragen zur Verbesserung von Qualitäts- und Sicherheitsstandards bei, und sie zeichnen sich nicht zuletzt durch eine hohe Integrationsfähigkeit in bereits bestehende Forschungs- und Entwicklungsprozesse aus. Das Potential der Modellierung, speziell in der industriellen Forschung und Entwicklung, kann man im Vergleich zu traditionellen, gänzlich testbasierten Entwicklungsprozessen oder gar zu empirischem „try and error“ (→ „*empirical engineering*“) kurz und prägnant zusammenfassen:

Modellierung im industriellen F&E-Umfeld ist „*knowledge-based engineering*“!⁴⁴

Die Grenzen der Modellierung sind nach dem bisher gesagten leicht zu benennen: „*Knowledge without know-how is sterile.*“ (M. Tribus)⁴⁵. Man beachte, dass einem Modell immer vereinfachende Annahmen zugrunde liegen und dass diese Annahmen dessen Anwendbarkeit zwangsläufig auf die dafür bestimmten Problemstellungen einschränkt. Diese Einschränkungen können (unmerklich) dazu führen, dass Modellerweiterungen das eigentliche Problem nicht mehr beschreiben! Eine mögliche Folge davon ist das sog. *wissenschaftliche Paradoxon*. Das Modell liefert eine im Grunde schlüssige Beschreibung eines Sachverhaltes, die gleichwohl im Widerspruch zur Beobachtung steht. Ein Paradoxon ist also immer ein guter Indikator dafür, dass es an wissenschaftlichem Know-how mangelt, weshalb der dem Modell zugrunde liegende Kenntnisstand die gegenwärtige Problemstellung einfach nicht mehr zu beschreiben vermag, sodass die wissenschaftliche Intuition bei der Anwendung physikalischen Know-hows zwangsläufig scheitern muss.⁴⁶ Möchte man entsprechend den Applikationsbereich eines Modells ausweiten, so ist vorab genau zu prüfen, ob die Modellvoraussetzungen immer noch erfüllt sind. Insbesondere sei der Hinweis erlaubt, dass unbekannte Effekte *prinzipiell nicht* (!) modelliert werden können. Modelle liefern trivialerweise nicht mehr als das, was vorab bei deren Aufbau an Know-how investiert wurde. Ergeben sich aus der Simulation dennoch „*neue und überraschende Erkenntnisse*“, so sind diese in erster Linie ein

Indiz für fehlendes Wissen in der Sache. In solch einem Fall ist man stets gut beraten, eine kritische Analyse jeder Modellierungsphase durchzuführen, um zumindest nachträglich sicherzustellen, dass im Verlauf des Modellierungsprozesses keine „*modellspezifischen Artefakte*“ übersehen wurden, die womöglich mit der eigentlichen Aufgabe nichts zu tun haben.

Neben rein technischen Problemstellungen (z.B. die fehlende numerische Stabilität eines mathematischen Modells, die mangelnde Nachvollziehbarkeit im Falle komplexer Modellansätze, fehlende Daten, erhöhter Ressourcenbedarf, etc.) besteht eine nicht zu unterschätzende Gefahr darin, dass bei der Modellbildung vorliegende Daten nur „*selektiv*“, d.h. zum Modellansatz passend ausgewählt werden, weil sich nur auf diese Weise ein konsistentes Bild zu ergeben scheint. Das damit erzielte Resultat dient in der Folge als Rechtfertigung für das zweifelhafte Auswahlverfahren, welches letztlich nur das allzu menschliche Ziel verfolgt die „*eigene Theorie*“ zu stützen.

Ein noch größeres Risiko bei der Modellierung besteht jedoch darin, dass man Modell und Realität gleichzusetzen beginnt. Man beachte deshalb *immer* folgenden Grundsatz:⁴⁷



„Verwechsle **niemals** Modell (→ Bild) mit Realität
(→ Beobachtung: Original)!“

G-1

Die Versuchung hierfür ist groß, insbesondere dann, wenn es sich um ausgesprochen erfolgreiche Modellierungskonzepte handelt, d.h. Anwendungen und experimentelle Überprüfungen „... *immer wieder zeigen, dass es sich tatsächlich so verhält, wie durch das Modell beschrieben!*“, sodass man in der Folge die wissenschaftliche Objektivität aufzugeben bereit ist und darüber hinaus innovative Alternativen aktiv zu unterbinden versucht, weil scheinbar „*realitätsfremd*“, soll heißen nicht konform mit dem aktuell favorisierten Modellkonzept. Francis Bacon mahnte in diesem Zusammenhang bereits im 16. Jahrhundert sehr eindringlich: „*Jede Feststellung und jede Theorie, an der unser Verstand ein besonderes Wohlgefallen findet, sollte unseren Argwohn hervorrufen.*“⁴⁸ Bedauerlicherweise kennt die Physikgeschichte zahlreiche Entwicklungen dieser Art, zum Teil sogar mit menschlich tragischem Ausgang. Hierbei unterliegt man jedoch einer weiteren grundlegenden Fehleinschätzung, indem man eine zweite entscheidende Grundregel des Modellierens missachtet, nämlich:



„Bewerte **niemals** die Qualität eines Modells,
indem Du es mit einem anderen Modell vergleichst!“

G-2

Diese recht fragwürdige Vorgehensweise entspricht beispielsweise in der experimentellen Physik dem zweifelhaften Versuch die Qualität ($\rightarrow$ Messgenauigkeit) eines experimentellen Aufbaus dadurch zu ermitteln, indem man das erzielte Messergebnis mit entsprechenden Werten aus der Literatur vergleicht, anstatt die tatsächlichen systematischen und statistischen Fehlergrößen des vorliegenden Messaufbaus zu bestimmen. Der einzig gültige Qualitätsmaßstab für die Anwendbarkeit eines konstitutiven Modells ist, neben mathematischer Konsistenz, dessen Übereinstimmung mit entsprechenden experimentellen Befunden. Sollten zwei unterschiedliche Modelle hierfür die gleiche Aussagekraft haben und man hätte eine Auswahl zu treffen, so ist prinzipiell jenes zu bevorzugen, das mit möglichst wenigen Annahmen zum Ziel kommt, d. h. den Sachverhalt schlüssig zu beschreiben vermag.⁴⁹

Im industriellen Umfeld führt häufig ein typischer „G2-Konflikt“ zu sinnlosen Kontroversen, beispielsweise bei der Produktentwicklung in Zusammenhang mit der Validierung neuer Produkte vor Markteinführung. Im Rahmen der Qualitätssicherung definiert man hierfür geeignete Testprozeduren, die sicherstellen sollen, dass das Produkt in der späteren Anwendung allen Anforderungen genügen wird, indem es zuvor ein vorgegebenes Validierungsprogramm erfolgreich durchlaufen muss. Die zugehörigen Testprozeduren sind spezifische Modelle der Erfahrungswelt und oftmals Ergebnis langjähriger empirischer Befunde, d. h. sie repräsentieren modellhaft den späteren Alltagsgebrauch. In einer frühen Phase der Produktentwicklung kommen aber zunehmend weitere Modelle, nämlich rechnergestützte Simulationsmodelle zum Einsatz, die ebenfalls Aspekte der Erfahrungswelt berücksichtigen und auf diese Weise die Produktoptimierung unterstützen sollen.

Der Konflikt: Scheitert dennoch ein erster Prototyp im späteren Validierungsprogramm des Testingenieurs, natürlich von allen unerwartet und entgegen positiver Prognosen durch den zuständigen Simulationsingenieur, steht nicht selten der Simulationsansatz in der Kritik, weil nicht konsistent zu den Testergebnissen.

Das Problem: Man vergleicht „Äpfel mit Birnen“, indem man die Qualität zweier Modellansätze zu bewerten versucht, die unter Umständen ganz verschiedene und komplementäre Aspekte der Erfahrungswelt abbilden. Konsistenz kann in diesem Fall aber nur hergestellt werden, wenn beispielsweise das Simulationsmodell ausschließlich das spätere Testmodell im Validierungsprogramm widerspiegelt – und nur dieses! Allerdings bleibt dann die Frage unbeantwortet, ob die so definierte (und dann redundante) Test- bzw. Simulationsprozedur den späteren Alltagsgebrauch auch tatsächlich korrekt und umfassend darstellen kann.

Ein letzter entscheidender Grundsatz der Modellierung besagt:



„Verlasse **niemals** bei der Beschreibung eines Phänomens die hierfür gewählte Modellwelt bzw. Modellierungsebene!“

G-3

Auch dieses Prinzip wird regelmäßig in Forschung und Lehre (meist unbewusst) missachtet. Man springt oftmals unbedacht von Modell zu Modell, erzeugt damit Widersprüche und erreicht hiermit nur allgemeine Verständnislosigkeit, nicht nur bei Schülern und Studenten. Diese wenig wissenschaftliche Praxis, sich über Modellierungsgrenzen hinwegzusetzen, führt zwangsläufig zu Verwirrung, insbesondere dann, wenn man diesen Fehler nachträglich damit zu korrigieren versucht, indem man ihm einen Namen gibt, wie z. B. „*Welle-Teilchen-Dualismus*“. Solch eine Vorgehensweise mag zu der (in diesem Fall auch verständlichen) Kritik aus anderen Forschungsdisziplinen beitragen, dass „*Physiker nie um eine Ausrede verlegen ...*“ seien. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes betrachten wir im Folgenden verschiedene Modelle zu einem physikalischen Phänomen, das uns ausgesprochen vertraut erscheint, weil wir ein spezielles Sinnesorgan hierfür haben: das Phänomen „*Licht*“. Das menschliche Auge ermöglicht uns, zahlreiche optische Naturerscheinungen zu studieren, z. T. unmittelbar auf visuellem Wege oder unter Verwendung von relativ einfachen optischen Hilfsmitteln. Je nach experimentellem Befund kann „*Licht*“ jedoch auf ganz unterschiedliche Art und Weise beschrieben, d. h. modelliert werden (vgl. hierzu Bild 1.11):

- a) **Lichtstrahl:** Einfache optische Aufbauten zeigen, dass Licht „*offensichtlich*“ geometrische Strahlen ausbildet, welche sich exakt geradlinig ausbreiten und an Grenzflächen nach einfachen Gesetzmäßigkeiten gebrochen oder reflektiert werden (Snell⁵⁰).

Als Schüler (der Mittelstufe eines naturwissenschaftlichen Gymnasiums) hatte ich seinerzeit große Probleme mit dem „Lichtstrahl-Modell“ und allem, was darauf beruhte (z. B. die Linsengleichung). Wieso konnte ich einen „Lichtstrahl“ senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung auf der optischen Tafel sehen? Schlimmer noch, alle meine Mitschüler im Physiksaal sahen diesen „gerichteten Strahl“ auch, obgleich sie ganz unterschiedliche Positionen im Raum innehatten – keiner saß in Strahlrichtung?! Mein damaliger Physiklehrer konnte mir nicht wirklich weiterhelfen, denn „Lichtstreuung“ und „Lichtstrahl“ sind schließlich nicht kompatible Modellansätze. Wieso soll ein Lichtstrahl immer „punktgenau ins Auge“ des Beobachters „gestreut“ werden und bleibt dann überhaupt noch genügend Licht in Ausbreitungsrichtung übrig? Was ist in diesem Zusammenhang überhaupt die „Ausbreitungsrichtung“ des Strahls, wodurch zeichnet sie sich noch aus?! Wieso „funktionieren“ die Gesetze der geometrischen Optik, wenn das zugrunde liegende Bild offensichtlich nicht konsistent zu sein scheint?!

- b) **Lichtteilchen (Äther und Korpuskel):** Die Beobachtung einer geradlinigen Lichtausbreitung ließ seinerzeit Huygens⁵¹ und Newton die Hypothese aufstellen, dass Licht eine Substruktur habe und aus Teilchen bestehen müsse. Huygens beschrieb Licht als Ausbreitungsphänomen eines Bewegungszustandes von Ätherteilchen (Stoßkaskade), ähnlich der Schallausbreitung in Luft. Wo-

hingegen Newton die Hypothese vertrat, dass der Lichtstrahl selbst aus sich schnell bewegenden Teilchen bestehen müsse (Korpuskularstrahl).

Man beachte: Die Huygens'sche Modellvorstellung ist kein Wellenmodell (wie leider oft zu lesen steht). Das zugehörige Bild einer Stoßkaskade ($\rightarrow$ „Stoßwelle“) von Ätherteilchen zeigt nämlich keine zeitliche (Frequenz) und keine räumliche (Wellenlänge) Periodizität. Huygens kannte diese Begriffe nicht. Entgegen der Newton'schen Hypothese bewegen sich jedoch im Huygens-Modell (wellentypisch) keine Ätherteilchen in Ausbreitungsrichtung der Stoßfront.

- c) **Lichtwelle:** Beugungs- bzw. Interferenzphänomene, u. a. zu beobachten an Kanten bzw. an dünnen Schichten, motivieren das Bild eines sich ausbreitenden Schwingungszustandes (Hooke⁵²) bzw. einer Lichtwelle (Fresnel⁵³, Young⁵⁴, Maxwell), d. h. einer räumlichen und zeitlichen Schwingung mit charakteristischer Frequenz und Wellenlänge.

Eine weitere physikalische Hürde während meiner Schulzeit: Was schwingt denn da senkrecht (!) zur Ausbreitungsrichtung einer im dreidimensionalen Raum propagierenden Kugelwelle? Was treibt die Welle an? Wie ist die Analogie zu Wasserwellen zu verstehen, was ist denn das „Wasser“ im Falle der Lichtwelle? Bedarf es bei Transversalwellen nicht eines Trägermediums, gibt es womöglich doch einen „Äther“?

- d) **Lichtquanten (Photonen):** Der photoelektrische Effekt, Lichtstreuung (Compton-Effekt⁵⁵), strahlungsinduzierte Absorptions-, Emissions- und Ionisationsprozesse zeigen eindeutig den Quantencharakter von Licht und erfordern zur korrekten Beschreibung die Einführung des Lichtquantums „Photon“ (Planck⁵⁶, Einstein).

Im späteren Leistungskurs Physik wurde es nicht wirklich besser: Die Lichtquanten-Hypothese war faszinierend und absolut unverständlich zugleich. Da trifft also eine ebene Lichtwelle auf eine Photoelektrode und die räumliche Energieverteilung der Welle kollabiert sodann zu einem quasi-punktförmigen „Energiequantum“, um in der Folge ein Photoelektron aus dem Festkörper zu lösen ... Wie geht das denn?! Der seinerzeit zitierte „Welle-Teilchen-Dualismus“ war keine wirklich zufriedenstellende Antwort auf unsere Fragen. Dem nicht genug, folgten später erste Erklärungsversuche mittels „Wahrscheinlichkeitswellen“ samt Schrödingergleichung⁵⁷ inklusive der gleichnamigen Katze?! Geht die Quantenphysik im Grenzfall sehr großer Quantenzahlen tatsächlich in die klassische Physik über?

- e) **„Lichtzustand“: Quantenfeldtheorie des Lichts (Quanten-Elektrodynamik – QED):** Die QED definiert den mathematischen Formalismus zur konsistenten Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie, sie liefert also auch eine widerspruchsfreie Lösung für die unter Punkt d) geschilderten Anschauungsprobleme eines überforderten Physik-Schülers. Die Theorie der Quantenfelder spiegelt einerseits mit beeindruckender Genauigkeit experi-

mentelle Befunde wider, andererseits ist sie einfach nicht zu verstehen! Quantenfelder sind nämlich keine „gewöhnlichen“ Felder, wie sie in der klassischen Physik mit großem Erfolg verwendet werden, sie beschreiben vielmehr abstrakte mathematische Operationen, anzuwenden auf ebenso abstrakte systemspezifische Zustandsvektoren. Die QED liefert prinzipiell für alle physikalischen Phänomene eine mathematisch korrekte Beschreibung mit Ausnahme der Gravitationswechselwirkung sowie Wechselwirkungsprozesse auf der Ebene der Kernphysik.

Als Physikstudent begegnet man frühestens im Hauptstudium (heute: Masterstudium) der QED. Mein Problem: eine natürliche Aversion gegen das (mathematisch nicht abzählbare) Unendliche in der Naturwissenschaft. Ob unendlich groß oder unendlich klein, sobald ein Modell in diese rein mathematisch definierten Bereiche vorstößt, ist dessen Applikationsbereich, also das physikalisch durch Beobachtung (d. h. Messung) erfassbare, mehr als nur überschritten, und man sollte spätestens dann tunlichst die Finger davon lassen.

Die QED lieferte in ihren Anfängen bei genauer Berechnung physikalisch relevanter Größen nur unendliche Werte. Erst durch einen „Taschenspielertrick“ (Zitat: R. P. Feynman), d. h. eine „geschickte“ Skalierung mit „Unendlich“ (→ Renormierung) ergaben sich brauchbare (und experimentell sehr genau bestätigte) Resultate. Wie ist das nun wieder zu verstehen? Richard P. Feynman schreibt hierzu:

„Niemand begreift es. [...] Die Natur, wie sie die QED beschreibt, erscheint dem gesunden Menschenverstand absurd. Dennoch decken sich Theorie und Experiment. Und so hoffe ich, dass sie die Natur akzeptieren können, wie sie ist – absurd.“⁵⁸

Hier wäre allerdings noch anzumerken: Die Natur ist selbstverständlich nicht absurd, bestenfalls das Bild, das wir uns von ihr machen. Der Physiker und Philosoph Meinhard Kuhlmann stellt deshalb folgerichtig fest:

„Die ungeklärte Deutung der Quantenfeldtheorie behindert den Fortschritt zu jeder Art von »neuer Physik« jenseits des Standardmodells, beispielsweise der Stringtheorie. Es ist heikel, eine neue Theorie zu formulieren, wenn wir die bereits vorhandene nicht verstehen.“⁵⁹

Ein bemerkenswerter Standpunkt, den ich uneingeschränkt teile!

- f) **Lichtgas:** Im thermodynamischen Gleichgewicht kann die thermische Strahlung auch als „Lichtgas“ beschrieben werden, alle hierfür notwendigen Parameter sind wohldefiniert und genügen den Gesetzen der klassischen Thermodynamik (Herrmann, 2003).

Ein interessantes Bild, das mir erstmals (und eher zufällig) an der Universität begegnete. Es half mir u. a. bei der Aufarbeitung prinzipieller Fragen rund um das Thema „Physikalische Modellierung“, insbesondere was wir Physiker eigentlich

genau tun, wenn wir zu „erklären“ versuchen „... was die Welt im Innersten zusammenhält“ (J. W. von Goethe).

Diese Modellvorstellung geht auf Arbeiten von Max Planck zurück, der mithilfe des Entropiebegriffs die nach ihm benannte Strahlungsformel erstmals klassisch herleitete.⁶⁰

- g) **Mechanische Spannung:** Das elektromagnetische Feld kann auch als mechanische Spannungsverteilung beschrieben werden (→ Maxwell'scher Spannungstensor). Sowohl die Maxwell-Heaviside-Gleichungen als auch der elektromagnetische Feldimpuls samt allgemeiner Impulserhaltung lassen sich daraus ableiten, vgl. z. B. (Henke, 2011).

Maxwell hatte selbst bereits auf diesen Aspekt „seiner“ elektromagnetischen Feldtheorie hingewiesen. Wir werden später im Buch noch genauer darauf eingehen, zumal diese Modellvorstellung zwanglos in das Impulsstrom-Konzept der Kontinuum-Mechanik passt (vgl. hierzu Abschnitt 5.3.4).

Die entscheidenden Fragen lauten demzufolge:

- Was also ist „Licht“ in Realität?
- Welches der vorgestellten sieben Modelle ist nun „objektiv richtig“?
- Welches Modell stellt das Phänomen „Lichtausbreitung“ auf korrekte Weise dar?

Die Antwort ist einfach und mag zugleich ernüchternd sein: *Alle* Modellansätze haben ihre Berechtigung, weil sie spezifische Charakteristika von Licht, allesamt in unserer Erfahrungswelt zu beobachten, innerhalb des zugehörigen Applikationsbereiches korrekt beschreiben.

Die Modelle sind qualitativ nicht oder nur bedingt untereinander vergleichbar, und keines davon zeichnet sich durch eine wie auch immer zu definierende bessere „Realitätsnähe“ aus. Bewertet man die zu den verschiedenen Modellhypothesen zu Licht gehörenden Theorien, so zeigt sich, dass diese aufeinander aufbauen, d. h. die geometrische Optik (GO) ist ein Spezialfall in der Elektrodynamik (ED) und diese wiederum folgt aus der Quanten-Elektrodynamik (QED) unter Vernachlässigung der Quantenstruktur. Die jeweils übergeordnete Theorie zeichnet sich durch einen erweiterten Anwendungsbereich aus, wie aus Tabelle 1.1 zu ersehen ist,⁶¹ d. h. sie liefert ein umfassenderes Bild des Naturgeschehens. Die „einfachen“ Modelle sind deshalb nicht qualitativ schlechter oder „weniger richtig“, im Gegenteil, sie sind meist zielführender und erleichtern in erheblichem Maße die problemspezifische Beschreibung des Naturgeschehens und dies oftmals auch noch ohne nennenswerte Abweichungen bei wichtigen quantitativen Aussagen.